



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Tomar

Ricardo Filipe Caldeira Mateus

ESTUDO DE MICRORREDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Dissertação de Mestrado

Orientado por:

Professor Doutor Mário Gomes

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Tomar
para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

Este trabalho teve apoio do projeto INDuGRID – *Efficient energy management in industrial microgrids with high penetration of PV technology*. Ref.: FCT/ERANet-LAC/0006/2014.

Resumo

Pretende-se com este trabalho estudar assuntos relacionados com microrredes. De modo a proceder a este estudo foi necessário conhecer ao certo o que é uma microrrede e a arquitetura da mesma, bem como as principais estratégias para o seu controlo.

Um dos componentes importantes para a operação das microrredes é o armazenamento de energia ao qual também foi dado ênfase neste trabalho. As tecnologias de produção de energia das microrredes são abordadas visto que sem produção (com base em fontes de origem renovável e/ou alternativa) as mesmas não existiriam.

Este trabalho tem ainda em linha de conta a abordagem de temas relacionados com a legislação de microrredes.

A componente mais prática deste trabalho consiste na realização de estudos sobre uma rede de distribuição de energia elétrica que inclui diversas microrredes. Para tal irá ser utilizado o *software* PSS/E.

Palavras-chave: Microrredes, energias renováveis, armazenamento, legislação, PSS/E

Abstract

The aim of this work was to study subjects related with the thematic of the microgrids. In order to conduct this study was necessary to understand in more detail what is a microgrids and its architecture, as well which are the main strategies for their control.

The energy storage is one of the most important components for the operation of microgrids, for this reason it was also emphasized in this work. The microgrids energy production technologies are also discussed, since without a production system (based on renewable and/or alternative energy sources) they would not exist.

The final subject of the theoretical part, is an analysis of the legal context concerning the microgrids

The most practical part of this work, consists on carrying out studies on an electricity distribution network which includes several microgrids. For this task it will be used the *software* PSS/E.

Keywords: Microgrids, renewable energies, storage, legislation, PSS/E.

Agradecimentos

Agradeço aos professores pelos ensinamentos transmitidos e pela disponibilidade demonstrada, em especial ao Professor Doutor Mário Helder Rodrigues Gomes, pelas suas indicações, sugestões, críticas e correções. O seu contributo foi imprescindível ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço à minha família e amigos que sempre me apoiaram e nunca me deixaram desistir. Agradeço também meus colegas de profissão que sempre me motivaram para atingir este objetivo.

Por último, mas não menos importante, agradeço ao Instituto Politécnico de Tomar e à Escola Superior Tecnologia de Tomar. Sem as condições disponibilizadas ao longo da minha formação académica este trabalho não seria possível.

Este trabalho teve apoio do projeto INDuGRID – *Efficient energy management in industrial microgrids with high penetration of PV technology*, com a referência FCT/ERANet-LAC/0006/2014.

Índice

Resumo	VII
Abstract.....	IX
Agradecimentos	XI
Índice	XIII
Índice de ilustrações	XVII
Índice de tabelas	XIX
Lista de abreviaturas e siglas	XXI
1 – Introdução.....	1
2 – Microrredes Eléctricas Inteligentes	3
2.1 – Normas europeias e norte-americanas	3
2.1.1 – Visão global	3
A- Séries de Normas 1547	4
2.1.2 - Situação Europeia.....	9
A- Incentivos.....	11
3 - Arquitetura das Microrredes.....	13
3.1 – Conceito de Microrrede	13
3.2 – Arquitetura funcional da microrrede	14
3.3 – Operação e estratégias de controlo da microrrede em modo normal	16
3.4 – Operação e estratégias de controlo da microrrede em modo isolado	17
3.5 – Tecnologias de geração, controlo e comunicações.....	22
3.5.1 – Tecnologias de geração	22
A- Solar fotovoltaico	23
B – Micro eólicas.....	25

C – Microturbinas.....	27
D – Pilhas de combustível.....	30
3.5.2 – Tecnologias de armazenamento	31
A – Baterias	32
B – Supercondensadores	33
C – Volantes de inércia	34
4.- Exposição do <i>Software</i> PSS/E	37
A – Arquitetura do PSS/E – simulações de fluxo de potência, curto-circuitos e dinâmica	37
B – Vantagens do PSS/E	39
C – Funcionalidades analíticas do PSS/E.....	42
5 – Estudo prático de uma microrrede	45
5.1- Cenário 1: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT sem as microrredes.....	48
5.2 – Cenário 2: Rede de distribuição operada em malha fechada (disjuntor entre os nós 12 e 13 fechado) alimentada pela subestação AT/MT sem as microrredes	50
5.3 – Cenário 3: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes	52
5.4 – Cenário 4: Rede de distribuição operada em malha fechada (disjuntor entre os nós 12 e 13 fechado) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes.....	54
5.5 – Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes e aumento da carga em 10%	56
5.6 – Cenário 6: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes e aumento da carga em 20%	58
5.7 – Cenário 7: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberta) em modo isolado (com as microrredes mas desconetada da subestação AT/MT)	61
6 – Conclusão	63

Referências bibliográficas	65
Anexo A – Esquema Elétrico da Rede Original	69
Anexo B –Esquemático da Rede de Teste	71
Anexo C – Dados relativos à Rede de Teste	73
Anexo D – Resultados relativos à simulação do cenário 1.....	77
Anexo E – Resultados relativos à simulação do cenário 2	79
Anexo F – Resultados relativos à simulação do cenário 3	81
Anexo G – Resultados relativos à simulação do cenário 4.....	83
Anexo H – Resultados relativos à simulação do cenário 5.....	85
Anexo I – Resultados relativos à simulação do cenário 6	87
Anexo J – Resultados relativos à simulação do cenário 7	89

Índice de ilustrações

Figura 1 – Séries de normas da IEEE 1547 referentes a interligações [3]	5
Figura 2 – Interoperacionalidade de Rede Inteligente: a integração de energia, comunicações e tecnologias de informação [3]	7
Figura 3 – Série de normas IEEE 2030 para redes inteligentes [3]	8
Figura 4 – Exemplos de aplicações de sistemas de armazenamento de energia integrados com a rede (IEEE 2030.2) [3]	9
Figura 5 – Esquema de uma microrrede	16
Figura 6 – Esquema de controlo <i>Single Master Operation</i>	20
Figura 7 – Esquema de controlo <i>Multi Master Operation</i>	21
Figura 8 – Célula fotovoltaica [5]	23
Figura 9 – Configurações possíveis da célula fotovoltaica [4]	24
Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema FV ligado à rede [4]	25
Figura 11 – Turbinas eólicas (direita: instaladas em terra; esquerda: offshore) [7][8]	26
Figura 12 – Microturbina a Gás [9]	27
Figura 13 – Esquema de funcionamento de uma microturbina de um veio	29
Figura 14 – Composição de uma pilha de combustível [10]	31
Figura 15 – Composição de um supercondensador eletroquímico [11]	33
Figura 16 – Constituição de um volante de inércia [12]	34
Figura 17 – PSS/E	41
Figura 18 – Aspeto de uma janela do PSS/E	44
Figura 19 – Diagrama da rede de testes original [14]	45
Figura 20 – Rede de testes final	46
Figura 21 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 1	48
Figura 22 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 2	50
Figura 23 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 3	52
Figura 24 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 4	54
Figura 25 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 5	57
Figura 26 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 6	59

Figura 27 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 7.....	61
Figura 28 – Pormenor da rede original.....	69
Figura 29 – Pormenor da rede de teste.....	71
Figura 30 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 1	78
Figura 31 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 2	80
Figura 32 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 3	82
Figura 33 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 4	84
Figura 34 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 5	86
Figura 35 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 6	88
Figura 36 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 7	90

Índice de tabelas

Tabela 1 – Quadro/resumo dos objetivos das diretivas relacionadas com as microrredes na União Europeia	9
Tabela 2 – Quadro/resumo das diretivas relacionadas com as microrredes na União Europeia, para as Energias Renováveis	10
Tabela 3 – Quadro/resumo das diretivas relacionadas com as microrredes na União Europeia, para a Conexão à Rede	10
Tabela 4 – Quadro/resumo das diretivas relacionadas com as microrredes na União Europeia, para Autoconsumo e Armazenamento de Energia	10
Tabela 5 – Sub-classificação de pequenas turbinas eólicas	26
Tabela 6 – Comparação entre microturbinas de um veio e dois veios	30
Tabela 7 – Potências geradas relativas ao cenário 1	49
Tabela 8 – Potências geradas relativas ao cenário 2	51
Tabela 9 – Potências geradas relativas ao cenário 3	53
Tabela 10 – Potências geradas relativas ao cenário 4	55
Tabela 11 – Potências geradas relativas ao cenário 5	57
Tabela 12 – Potências geradas relativas ao cenário 6	60
Tabela 13 – Potências geradas relativas ao cenário 7	62
Tabela 14 – Dados relativos aos geradores da rede de teste	73
Tabela 15 – Dados base relativos às cargas da rede de teste	73
Tabela 16 – Dados base relativos às cargas com acréscimo de 10%	74
Tabela 17 – Dados base relativos às cargas com acréscimo de 20%	74
Tabela 18 – Dados referentes às linhas da rede de teste	75
Tabela 19 – Dados referentes aos transformadores da rede de teste	76
Tabela 20 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 1	77
Tabela 21 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 2	79
Tabela 22 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 3	81
Tabela 23 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 4	83
Tabela 24 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 5	85

Tabela 25 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 6	87
Tabela 26 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 7	89

Lista de abreviaturas e siglas

AC – *Alternate Current*

CE – Comissão Europeia

CHP – *Combined Heat and Power*

DC – *Direct current*

DFIM – *doubly-fed induction motor*

DMS – *Distribution Management System*

EUA – Estados Unidos da América

FACTS – *Flexible AC Transmission Systems*

FIT – *Feed in tariffs*

FV – Fotovoltaico

GUI – *Graphical User Interface*

HAWT – *Horizontal-axis wind turbine*

LC – *Load Controller*

LCD - *Liquid crystal display*

MC – *Microsource Controller*

MF – Microfonte

MGCC – *Micro Grid Central Controller*

MMO – *Multi Master Operation*

MR – Microrredes

MT – Média Tensão

PD – Produção dispersa

PME – Pequenas e Médias Empresas

PI - *Proporcional-integral*

SEE – Sistema elétrico de energia

SMO – *Single Master Operation*

UE – União Europeia

VAWT – *Vertical-axis wind turbine*

VSI – *Voltage Source Inverters*

1 – Introdução

As sociedades modernas dependem criticamente do fornecimento seguro de energia. As entidades responsáveis têm manifestado crescentes preocupações para com a disponibilidade de energia tal como pelo envelhecimento das infraestruturas de transmissão de energia elétrica. O desenvolvimento das sociedades e a alteração de paradigmas dos setores energéticos estão a criar cada vez mais desafios ao nível das redes elétricas em termos de segurança, de fiabilidade e de qualidade do fornecimento. Neste sentido, são necessárias grandes quantidades de investimento para desenvolver e renovar as infraestruturas de forma mais eficiente para atender às exigências da sociedade é necessário incorporar soluções inovadoras, e tecnológicas nas arquiteturas de rede. De acordo com a Agência Internacional de Energia, será necessário um investimento global de 16 triliões de dólares no sector da energia ao longo do período 2003-2030 [1].

As redes elétricas do futuro terão de lidar com as mudanças na tecnologia, com os valores da sociedade, com o meio ambiente e com a economia. Assim a segurança do sistema, a segurança de operação, a proteção ambiental, a qualidade de energia, o custo da oferta e a necessidade de eficiência energética são pontos que necessitam de ser revistos como resposta às exigências da mudança para um mercado liberalizado. As tecnologias devem também demonstrar níveis adequados de fiabilidade, sustentabilidade e rentabilidade. A noção de redes inteligentes refere-se à evolução das redes de eletricidade. É neste âmbito que se desenvolverá esta tese [1].

Com este trabalho pretende-se adquirir novos conhecimentos sobre microrredes elétricas inteligentes. Neste sentido pretende-se efetuar uma pesquisa aprofundada sobre este tema, em termos técnicos e económicos mas também normativos no âmbito da EU e dos EUA.

Com base neste estudo será desenvolvido uma abordagem otimizada de exploração do sistema.

No primeiro capítulo deste trabalho está definida a introdução e estrutura. No segundo capítulo é realizada a revisão da literatura sobre a evolução das normas que regulam as microrredes quer na União Europeia, como a nível global.

No terceiro capítulo são abordados os aspetos mais relevantes relacionados com a arquitetura das microrredes, nomeadamente a definição e os modos de operação das microrredes e as tecnologias de geração e armazenamento de energias inevitavelmente usadas nestas infraestruturas.

No quarto capítulo é apresentada a parte mais prática do trabalho onde se explicam algumas das funções e potencialidades do *software* PSS/E da Siemens. Esta tecnologia foi utilizada como ferramenta de cálculo e simulação relacionados com os estudos realizados a uma rede de distribuição com microrredes.

No capítulo cinco apresentam-se os estudos efetuados a uma rede eléctrica com diversas microrredes associadas. A partir desta rede foram desenhados e simulados diversos cenários de forma a verificar os efeitos das microrredes na rede eléctrica. Tal como referido, de modo a levar a cabo as referidas simulações utilizou-se o *software* PSS/E.

Assim sendo, o objetivo principal deste trabalho consiste em compreender melhor o funcionamento das microrredes e os seus efeitos na rede eléctrica, de modo a servir de base para trabalhos futuros nesta temática, em especial para a aplicação de microrredes eléctricas em contexto industrial.

2 – Microrredes Eléctricas Inteligentes

Uma das melhores soluções face aos problemas atuais do sistema eléctrico europeu é através da implementação de microrredes de forma a aumentar o consumo de energia renovável, melhorando a eficiência, reduzindo as emissões de CO₂ e, por conseguinte, cumprir as metas da Comissão Europeia para 2020. Foram estabelecidos regulamentos pela UE, apesar de existirem particularidades de cada estado membro que podem representar barreiras. Por este motivo, é importante perceber como a Europa e o Mundo estão a assumir as suas responsabilidades para com a penetração das microrredes e como as diretivas são transpostas [2].

2.1 – Normas europeias e norte-americanas

2.1.1 – Visão global

A IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) Standard 1547 tem sido um documento fundamental para a interligação das MR com o SEE [3]. A norma 1547 é o único padrão americano que aborda a ligação MR-SEE. Isto tem um grande significado porque permite que a indústria da energia realize os negócios e continue a influenciar a maneira como os SEE operam nos Estados Unidos. Esta norma ajudou a modernizar as estruturas dos SEE determinando a base para a integração de energias renováveis bem como outras tecnologias de PD e armazenamento de energia. Este regulamento fornece especificações e requisitos técnicos funcionais obrigatórios, assim como, apresenta a flexibilidade e as escolhas sobre os equipamentos e o seu funcionamento com detalhes que provam que estão em conformidade com as normas [3].

A rede é tecnicamente e operacionalmente complexa, incluindo as dificuldades entre as conformidades normativas e as diversas autoridades que possuem jurisdição sobre a rede. A perspetiva tradicional é a de um grande número de centrais de geração de energia, em que cada uma delas fornece centenas de MW de potência. A partir daqui, as linhas de

transmissão de alta tensão de alimentação transportam a eletricidade para grandes distâncias até às redes de distribuição que, em seguida, fornecem os consumidores [3].

Nas décadas de 1900 e seguintes a produção dispersa e as energias renováveis começaram a tornar-se mais rentáveis. Os consumidores de eletricidade poderiam assim adquirir e instalar geradores de produção dispersa e tecnologias renováveis. Isto trouxe alguma preocupação à perspetiva tradicional da infraestrutura elétrica, visto que alguns consumidores se tornaram produtores de eletricidade. Esta produção dispersa pelos consumidores-localizados afetou a rede de distribuição na medida em que alguns circuitos experimentaram fluxos de potência bidirecionais ou reduziram bastante o fluxo unidirecional a um nível significativamente inferior à projetada. Esta situação afetou também a implementação de equipamento auxiliar de rede de distribuição e as respetivas operações [3].

A- Séries de Normas 1547

As séries de normas 1547 estão apresentadas na Figura 1. Em conjunto estas fornecem um vasto leque de requisitos, de práticas recomendadas, e de orientações para abordar a interconexão normalizada das MR. Na Figura 1, as caixas a azul representam as normas publicadas com o ano da sua publicação entre parênteses, as caixas a branco mostram documentos em desenvolvimento [3].

As séries de normas 1547 foram desenvolvidas por *IEEE Standards Coordinating Comitee* (SCC21). A organização *American Nacional Standards* abriu um consenso fundamental para o desenvolvimento com sucesso da norma IEEE 1547, incluindo reguladores, advogados, engenheiros, empresários e investigadores [3].

A norma IEEE 1547 foi desenvolvida por 444 pessoas e aprovado pela IEEE em junho de 2003.

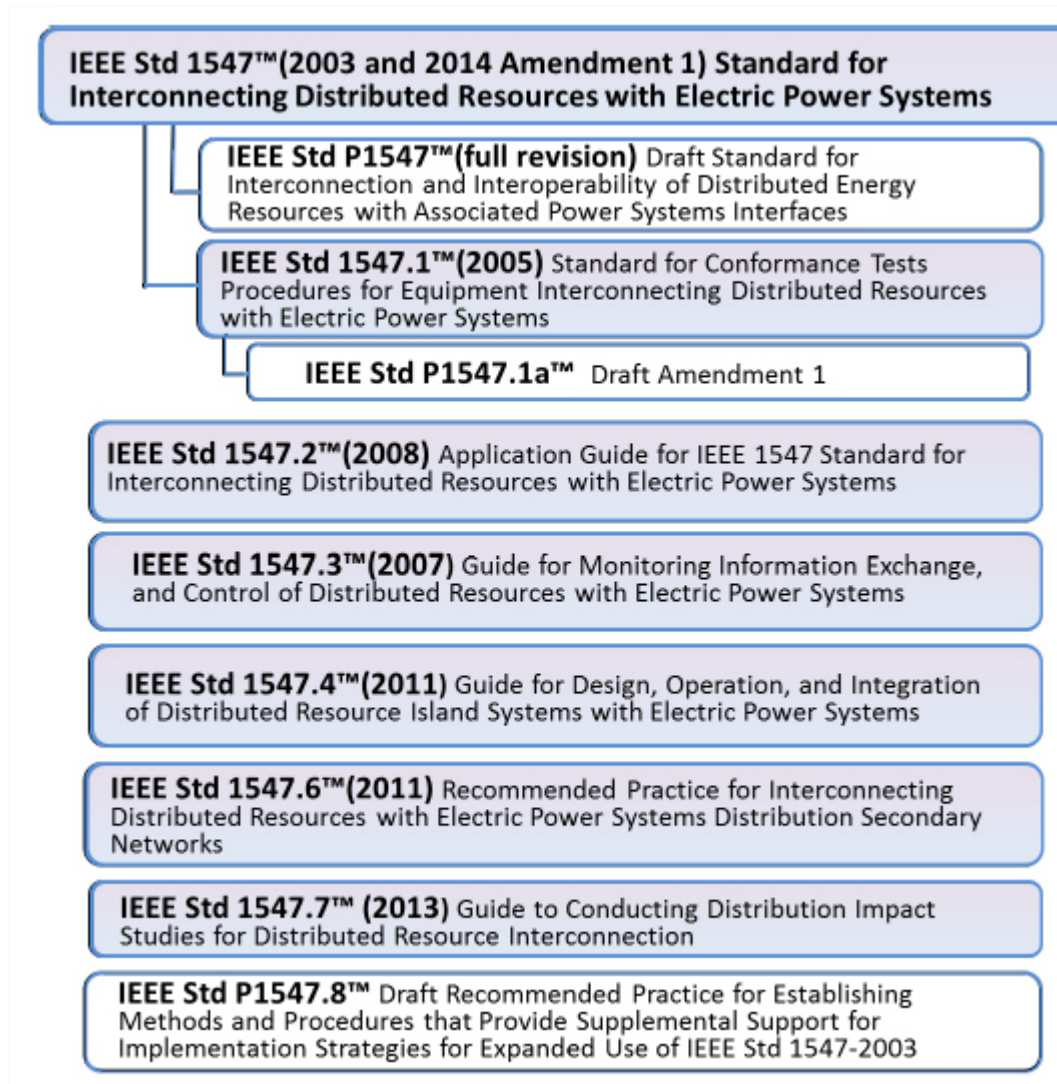


Figura 1 – Séries de normas da IEEE 1547 referentes a interligações [3]

Evolução da norma IEEE 1547 em direção à Interconexão avançada e Interoperabilidade

Os avanços da tecnologia e o desenvolvimento de avançadas funcionalidades e controle integrado de MR, tal como, a investigação da interoperabilidade de redes inteligentes e desenvolvimento dos investigadores têm superado as exigências das normas atuais e dos códigos para instalações MR, assim como, da interligação com a rede de distribuição [3].

Em dezembro de 2013, a IEEE SCC21 estabeleceu uma revisão completa da norma IEEE 1547. Com esta revisão, os membros da comissão americana definiram que o IEEE1547 revisto iria abordar as interfaces de interoperabilidade e associações entre MR e a rede. Para a revisão completa da IEEE 1547, os aspetos interoperabilidade e as interfaces associadas irão adotar o padrão IEEE 2030, além da série 1547 [3].

A definição de interligação segundo a norma 1547 revista é a seguinte: “Interligação - uma ligação lógica de uma entidade para que suporte um ou mais fluxos de dados implementado com uma ou mais ligações de dados” IEEE 2030) [3].

A Figura 2 inclui a definição de interoperabilidade (IEEE 2030) e representa graficamente as áreas de foco da interoperabilidade para a energia elétrica e para as tecnologias de comunicação e informação que constituem o núcleo tecnológico das Redes Inteligentes [3].

A norma IEEE 2030 (de 2011; Figura 3) foi desenvolvida por membros voluntários do IEEE, cujas afiliações correspondem a três áreas técnicas primárias - da indústria de energia elétrica, técnicos de comunicações e especialistas em tecnologia da informação [3].

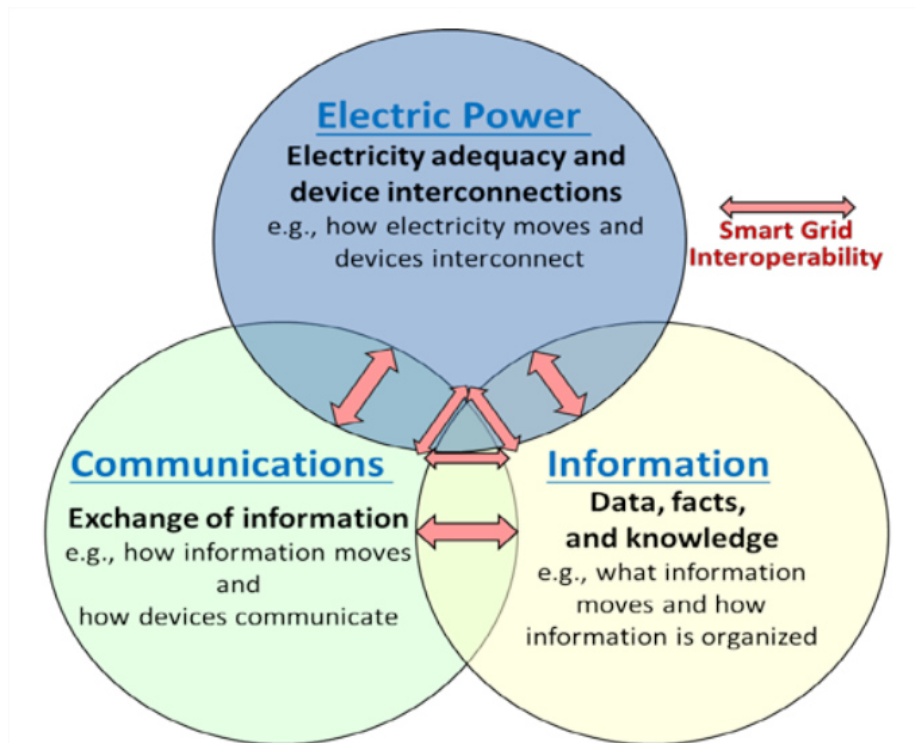


Figura 2 – Interoperacionalidade de Rede Inteligente: a integração de energia, comunicações e tecnologias de informação [3]

A norma 2030 é um guia IEEE que fornece uma base de conhecimento abordando a terminologia, as características e o desempenho funcional das Redes Inteligentes; estabelece o *Smart Grid Interoperability Reference Model 2030* (SGIRM). O SGIRM permite de forma inerente uma extensibilidade, escalabilidade e capacidade de atualização. Com o SGIRM definem-se as arquiteturas integradas para sistemas de energia, a tecnologia de comunicações e a tecnologia da informação. O principal foco do SGIRM são as interfaces funcionais, as conexões lógicas e os fluxos de dados. Juntamente com o padrão IEEE 2030 estabelece os quadros e classificação de características de fluxo de dados, indica os modelos para estabelecer as necessidades, identifica e integra os protocolos de tecnologia de informação e comunicação e estabelece normas, abordando temas como a fiabilidade, segurança, qualidade do serviço, e meios de comunicação [3].

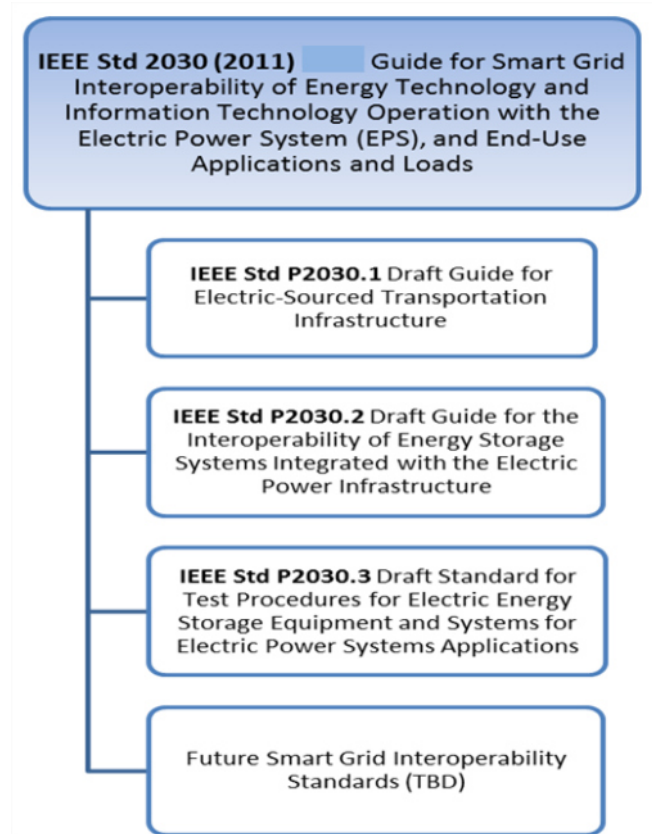


Figura 3 – Série de normas IEEE 2030 para redes inteligentes [3]

O padrão IEEE 2030.2 (Figura 3) foi aprovado pelo IEEE em agosto de 2014. O documento aborda a integração de sistemas de armazenamento e a energia híbrida, incluindo aplicações de uso final e as cargas. A norma IEEE 2030.2 baseia-se na IEEE 2030, fornecendo a orientação na compreensão e definição de características técnicas dos sistemas de armazenamento de energia e como eles podem ser usados em compatibilidade com as infraestruturas eléctricas [3].

A norma IEEE 2030.2 inclui ainda exemplos de aplicações de sistemas de armazenamento de energia. Em seguida apresentam-se algumas dessas aplicações, que estão representadas na Figura 4.

- Regulação de frequência;
- Serviços de energia distribuída;
- Sistemas de armazenamento de energia para microrredes;
- Integração de energia renovável, incluindo deslocamentos de picos;
- Múltiplos serviços combinados de suporte à rede.

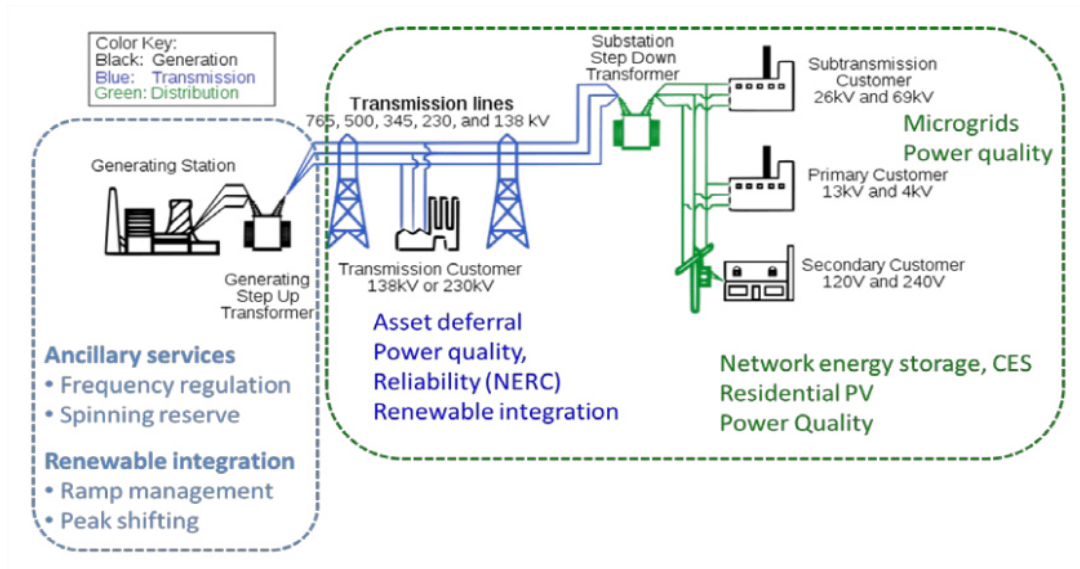


Figura 4 – Exemplos de aplicações de sistemas de armazenamento de energia integrados com a rede (IEEE 2030.2) [3]

2.1.2 - Situação Europeia

Uma vez que não há legislação específica para microrredes na UE deve ser tida em conta a Tabela 1. Os regulamentos da UE compõem diretivas desenvolvidas pelo Parlamento e pelo Conselho Europeu. É importante notar que cada Estado membro transpõe as referidas diretivas seguindo as particularidades do seu quadro regulamentar nacional. Ainda assim, estas diretivas são uma clara referência para o estudo geral da situação na Europa no que diz respeito às microrredes. As Tabela 2, 3 e 4 apresentam as principais diretrizes para cada campo definido na Tabela 1 [2].

Tabela 1 – Quadro/resumo dos objetivos das diretivas relacionadas com as microrredes na União Europeia

Objetivo da diretiva	Componentes considerados da microrrede
Energias renováveis	Unidades de geração renovável
Conexão com a rede	Requisitos de ligação de cargas à rede de distribuição, unidades de geração de energia, e dispositivos de armazenamento de energia
Auto-consumo e armazenamento de energia	Condições para entrega de excesso de produção, possibilidade de uso de sistemas de armazenamento

Tabela 2 – Quadro/resumo das diretivas relacionadas com as microrredes na União Europeia, para as Energias Renováveis

Energias Renováveis	
Diretiva	Conteúdo
2009/28/EC	O documento define metas para a energia renovável: quota de 20 % de energias de fontes renováveis e 10% de energias renováveis no sector dos transportes até 2020. Os planos nacionais devem ser estabelecidos de acordo com estes objetivos.
2006/32/EC	Esta diretiva tem como objetivo aumentar a eficiência energética em produtos e processos, afetando aos operadores das redes de distribuição e retalhistas. O objetivo principal é obter uma poupança de energia a nível nacionais de 9% para os 9 anos de prazo de validade diretiva.

Tabela 3 – Quadro/resumo das diretivas relacionadas com as microrredes na União Europeia, para a Conexão à Rede

Conexão á rede	
Diretiva	Conteúdo
2008/72/EC	Esta diretiva define a regulamentar comum relativamente à geração, transporte, distribuição e fornecimento de eletricidade, definindo a gestão e operação do setor elétrico.

Tabela 4 – Quadro/resumo das diretivas relacionadas com as microrredes na União Europeia, para Autoconsumo e Armazenamento de Energia

Autoconsumo e armazenamento de energia	
Diretiva	Conteúdo
2004/8/EC	Este regulamento promove cogeração de calor e energia de alto rendimento para aumentar a eficiência energética e a segurança do fornecimento. A eficiência do processo é determinado através de um método de cálculo específico.

A quantidade de regulamentos da UE diretamente aplicáveis a microrredes é diminuta, o que também aumenta as diferenças entre as regulamentações para microrredes em cada Estado membro. No entanto com o impacto de alguns regulamentos, como o 2009/28/CE, a

promoção das energias renováveis é considerável, uma vez que os países europeus devem apresentar planos e estratégias viáveis em termos de economia e aspetos técnicos para chegar aos objetivos para 2020 [2].

A- Incentivos

De modo a atingir as metas das diretivas europeias relacionadas com microrredes, os Estados membros implementaram estratégias baseadas em incentivos económicos. Apesar do maior regime de apoio comum na UE se basear em FITs, outros incentivos para microrredes com geração renovável são analisadas nas seguintes secções [2].

1- **Feed in tariffs - FITs** são incentivos do governo para a implementação de energias renováveis, de forma a acelerar o investimento nestas tecnologias. Estas tarifas incluem o acesso à rede, os contratos de troca de energia a longo prazo e a negociação dos preços de mercado para os proprietários. Então, esse incentivo adquire o risco de investimento e o risco de preço relacionados com a concorrência no mercado.

Na UE, um regime FITs bem adaptado é considerado como o programa mais eficiente e eficaz para promover as energias renováveis. O instrumento FITs correspondeu ao sistema de apoio principal para energias renováveis na UE e, consequentemente, os custos de investimento inicial para estas tecnologias caíram e a produção expandiu-se consideravelmente. Por esta razão, a CE propôs recentemente uma redução para o mínimo necessário de modo a mitigar efeitos negativos para o sector e introduzir ERs no mercado com novos regimes de apoio.

2- **Prémio de mercado** - O prémio de mercado fornece aos produtores de energias renováveis as receitas extras acima dos preços da energia fixados no mercado, que não varia com as mudanças sazonais dos custos da energia. Deste modo, é assegurada uma certa compensação pelo investimento feito para os geradores de energias renováveis. Atualmente, variados incentivos têm sido implementados, compondo um esquema de suporte semelhante ao FIT. No entanto, a diferença é que o prémio de mercado elimina o preço do risco. No entanto, como as tecnologias de geração de energias renováveis têm crescido consideravelmente este risco é menor. A CE propõe este instrumento financeiro, o prémio de mercado, como uma alternativa possível para ajustes.

3- **Certificados verdes** – Estes programas definem metas anuais de energia renovável e, como consequência, as receitas adicionais superiores aos das vendas de energia são estabelecidos para produtores de energias renováveis para cumprir essas metas. Os certificados verdes podem ser negociados para que as empresas cumpram com as obrigações de energia renováveis [2].

3 - Arquitetura das Microrredes

Para analisar a arquitetura das microrredes é necessário perceber o que são de facto as microrredes (MR).

A designação de MR surgiu recentemente com a proliferação das tecnologias de PD, o aumento da incorporação deste novo tipo de produção de energia gerou questões nunca levantadas até então. Esta alteração de paradigma introduzida no modo de operação do SEE fez com que se procurassem novas abordagens quanto à operação e gestão do mesmo. Com o intuito de beneficiar das vantagens da introdução de micro-geradores nos níveis de baixa tensão e resolver problemas gerados pelos mesmos criou-se o conceito de MR. Com este novo conceito apareceram também novas capacidades e oportunidades de aperfeiçoamento da fiabilidade e eficiência energética do sistema [4].

3.1 – Conceito de Microrrede

A MR assenta num princípio de produção de energia descentralizada. Sendo que da implementação do conceito de MR advêm diversas vantagens em várias áreas.

Quando comparadas com redes elétricas de grandes dimensões e produção centralizada, a MR propicia uma distribuição de energia mais eficiente, tendo em conta a elevada integração de PD. Para além disso, as perdas elétricas nas linhas são largamente reduzidas uma vez que a distância entre a produção e o consumo diminui substancialmente. Esta aproximação permite ainda a exploração da micro-cogeração e a consequente procura do calor produzido para fins domésticos. A exploração de tecnologias micro-CHP influencia positivamente o aumento da eficiência energética global do sistema, elevando-a para um patamar muito superior ao alcançável em centrais convencionais. Consequentemente, a diminuição de perdas e o aumento da eficiência energética, conduzem a ganhos relevantes a nível económico.

Se corretamente projetada, a MR tem ainda potencial para aumentar a fiabilidade da rede, uma vez que passam a existir duas formas de fornecer energia às cargas (a rede de MT e as

MF inseridas na MR). A estabilidade dinâmica do sistema pode igualmente ser melhorada, visto que existe a hipótese da MR participar no fornecimento de serviços auxiliares à rede.

As tecnologias utilizadas nas MR recorrem essencialmente a recursos endógenos que se caracterizam pelos seus baixos (ou nulos) valores de emissão de gases que provocam o efeito de estufa. A já indicada diminuição de perdas nas linhas, contribui também para a redução da emissão de gases. Por estas razões, considera-se que com as MR verificam-se significativos ganhos a nível ambiental.

As MR, tal como referido, apresentam a possibilidade de explorar recursos endógenos e combustíveis fósseis (caso do uso de microturbinas em regime de micro-cogeração) de forma eficiente. Esta potencialidade possibilita a redução da dependência dos combustíveis fósseis e aumenta a capacidade de abastecimento eléctrico da rede. Ainda assim, o uso destes recursos força a utilização de interfaces de electrónica de potência o que demonstra uma considerável diferença quando comparados com os sistemas convencionais, que recorrem a geradores síncronos. O tipo de MF usada não tem inércia, o que faz com que o comportamento dinâmico das MR seja substancialmente diferente do das redes convencionais.

3.2 – Arquitetura funcional da microrrede

O projeto europeu *Microgrids* sugere uma estrutura hierárquica para o controlo da MR [4]. Nesta abordagem, o elemento fulcral é o controlador central (*Micro Grid Central Controller* – MGCC), instalado no ponto de interligação da MR com a rede MT. O seu papel é a manutenção de uma gestão harmonizada da MR a nível técnico e económico. O MGCC tem a capacidade de fornecer previsões de consumo de cargas e previsões da capacidade produtiva de MF intermitentes (por exemplo, a eólica). Possui também acesso a preços de mercado, a propostas de compra por parte das MF e a prioridades das cargas a alimentar, o MGCC é assim uma unidade de controlo e gestão bastante completa.

No seguinte nível da hierarquia estão os controladores de armazenamento de energia e das MF, as *Microsource Controller*. Estes dispositivos permitem o controlo da produção de potência ativa e reativa (exceto em casos que a MF não permita). Neste nível hierárquico, localizam-se os sistemas de controlo de cargas (*Load Controller* – LC). O LC tem por

função o controle de cargas, tendo capacidade para, caso necessário, deslastrar cargas não prioritárias mantendo alimentadas as cargas consideradas prioritárias.

É também essencial uma rede de comunicações para que o MGCC consiga comunicar com os MC e os LC. De referir que o volume de dados trocado é reduzido, uma vez que, as comunicações entre dispositivos consistem basicamente no envio de *set points* do MGCC para os LC e MC e, paralelamente, em pedidos e respetivos envios de leitura dos níveis de potência ativa e reativa do MGCC, aos LC e MC.

É necessária também a comunicação entre o MGCC e o *Distribution Management System* (DMS), do lado do operador de sistema. Esta interligação entre MR e SEE, permite explorá-la como um eventual meio para melhorar a operação da rede, sendo que possibilita também à MR colaborar nos serviços auxiliares do sistema, tais como regulação de tensão e controlo de potência.

Tal como referido, são possíveis dois modos de funcionamento da MR, que podem ser definidos da seguinte maneira:

- **Funcionamento em modo normal:** A MR encontra-se conectada à rede de MT a montante, sendo por ela alimentada total ou parcialmente, ou injetando um dado valor de potência na rede (conforme a relação entre a produção das MF e o consumo total da MR);
- **Funcionamento em modo de emergência:** Na eventualidade de uma falha da rede a montante, ou caso haja necessidade de intervenção (manutenção, por exemplo), planeadas na MR, esta poderá ter necessidade de funcionar em regime isolado, ou seja, desligada da rede de MT.

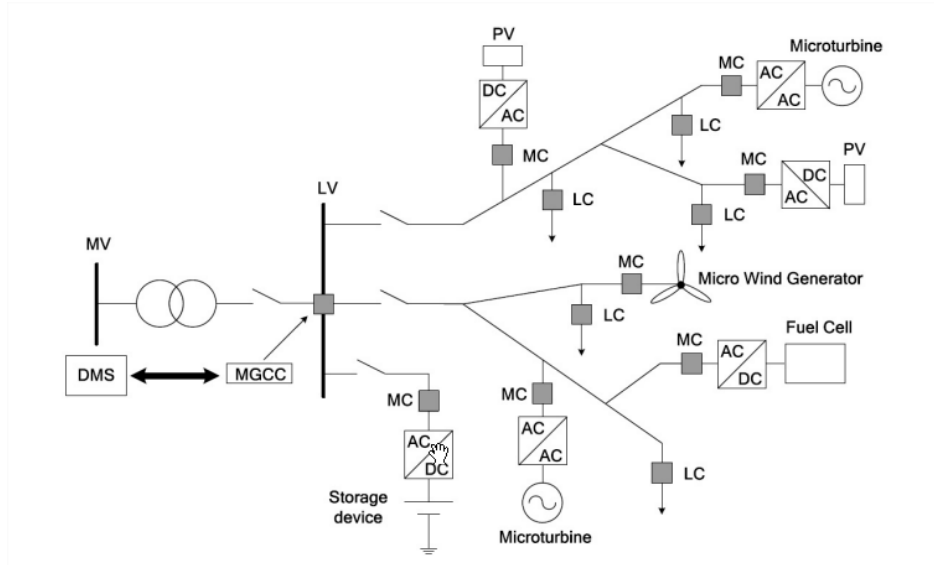


Figura 5 – Esquema de uma microrrede

3.3 – Operação e estratégias de controlo da microrrede em modo normal

No modo de funcionamento normal, o MGCC tem como função a gestão correta da MR tanto a nível técnico como económico. Fazendo uso da capacidade de previsão já referida anteriormente o MGCC otimiza o funcionamento da MR auxiliado pelos MC e LC, localizados num nível hierárquico inferior. Este auxílio é assegurado pela troca de informação existente entre ambos os níveis hierárquicos [4].

A comunicação processa-se do seguinte modo:

- O MGCC lida com a questão técnica e económica da MR, funcionando como um operador de mercado e atribuindo os *set points* a enviar aos MC e LC;
- Os *set points* são enviados aos MC e LC;
- Uma vez recebidos os *set points*, os LC são notificados quanto às cargas que devem alimentar ou desligar e as respetivas prioridades, por sua vez os MC regulam os níveis de produção de energia ativa e reativa das MF;
- Os LC e MC enviam a informação relativa aos níveis de carga ou produção existentes no momento caso seja solicitado pelo MGCC.

O MGCC é capaz de prever consumos e produção, e pode aceder aos preços de combustíveis e eletricidade do mercado. Baseado nessas informações, tem a possibilidade de determinar a capacidade de energia que a MR deve absorver da rede de distribuição de MT a montante, otimizando a capacidade de produção local. O cenário operacional definido é atingido devido à capacidade de gerir as MF e cargas controláveis, necessitando apenas de enviar os sinais (*set points*) necessários para o terreno.

Do ponto de vista económico e quanto às operações de mercado, admitem-se duas estratégias: na primeira o MGCC concentra-se em reduzir o custo da energia aos consumidores finais descurando a venda de energia à rede e na segunda hipótese passa por maximizar o valor da MG vendendo o excesso de energia à rede.

3.4 – Operação e estratégias de controlo da microrrede em modo isolado

O funcionamento isolado da MR pode ser originado por anomalias na rede de distribuição que forcem o isolamento da MR por questões de segurança ou por intervenções programadas que provoquem o isolamento da mesma. Durante o funcionamento em modo isolado, a MR tem de conseguir alimentar as cargas que lhe estão associadas (ou no mínimo as mais prioritárias) e preservar os níveis de tensão e frequência dentro de uma gama de valores bem delimitada. No momento do isolamento uma súbita alteração ao despacho das MF é solicitada à MR, uma vez que esta passa a controlar de forma ativa toda a porção da rede isolada. As estratégias assumidas pelo MGCC têm, portanto, de ser diferentes das adotadas no modo normal de funcionamento, dando prioridade à manutenção da estabilidade da MR e à alimentação do maior número de cargas possível, diminuindo a importância das questões económicas [4].

Atualmente, caso haja isolamento de parte da rede de distribuição provocado por um defeito na rede a montante todas as unidades de PD (e respetivas cargas) são desligadas, voltando a funcionar apenas após a resolução do problema. Esta situação acontece por motivos de segurança, uma vez que, não existindo estruturas de comunicação suficientes é impossível saber quais as linhas que se encontram sob tensão na porção isolada da rede. Isto representa um grande risco para as equipas de manutenção. Para lá desta questão,

coloca-se ainda o problema da incapacidade das MF de manter os níveis de frequência e tensão aceitáveis na rede, o que conduziria a sérios problemas do ponto de vista da qualidade do fornecimento de energia eléctrica. Também o sistema de proteções das redes corre o risco de deixar de se enquadrar com o novo regime de funcionamento, uma vez que as correntes de curto-circuito envolvidas neste processo são reduzidas.

Tendo em conta a actual filosofia do Operador de Distribuição, a segurança, a qualidade de serviço e a integridade do sistema eléctrico são questões fulcrais de maneira a assegurar o bom funcionamento do sistema, o que os torna fatores fortemente condicionantes à aceitação da operação em modo isolado. Isto acontece essencialmente, devido à falta de infraestruturas de monitorização e controlo.

Como já foi referido, a MR tem a capacidade de melhorar a fiabilidade geral do SEE, principalmente devido à capacidade de funcionamento em modo isolado. Ainda assim esta melhoria encontra-se limitada pela existência de uma estrutura de controlo autónoma capaz de possibilitar o funcionamento das MF e o abastecimento das cargas em modo isolado. A existência de equipamento de protecção devidamente dimensionado e preparado para proteger a MR é também indispensável.

Considerando um cenário ideal no qual todas as infraestruturas necessárias são disponibilizadas, existem ainda diversas questões operacionais a ter em conta. A MR é forçada a manter a sua tensão e frequência controlada. No entanto, os tipos de MF utilizadas ligam-se à MR maioritariamente através de dispositivos de electrónica de potência, ou seja, não têm inércia. Esta situação provoca um comportamento dinâmico diferente do verificado em redes convencionais. De modo a impor valores de referência para a tensão e frequência da MR tornando-se necessário recorrer à electrónica de potência, de maneira a emular o comportamento de uma máquina síncrona (inexistentes nas MR). A ‘responsabilidade’ de emular esse comportamento compete aos inversores de fonte de tensão (*Voltage Source Inverters – VSI*).

Apesar da utilização dos VSI, existe a dificuldade em equilibrar instantaneamente a produção com a carga no momento de um súbito desequilíbrio (causado, por exemplo, pela ligação de uma carga), principalmente porque a resposta da maioria das MF é “lenta”. O uso de dispositivos de armazenamento de energia é por isso importante para a operação da

MR em modo isolado. Alternativamente pode também ser considerado o deslastre de carga no que diz respeito à regulação de tensão e frequência da MR.

Adicionalmente ao VSI existe outro modo de operação das MF através da eletrónica de potência. Esta solução de controlo, ao contrário da anterior, não emula o comportamento de uma máquina síncrona e como tal não tem capacidade de impor valores de frequência ou tensão na rede. São os inversores PQ. Seguidamente será descrito o modo de funcionamento destes inversores:

- **Inversores PQ** – A totalidade da energia disponível é introduzida na rede. A potência reativa injetada é determinada localmente ou através do sistema de supervisão e controlo;
- **Inversores VSI** – Tal como referido, estes inversores emulam o comportamento de uma máquina síncrona. Quando funcionam em regime normal, interligados com uma rede robusta, tensão e frequência são impostas externamente pela rede. No que diz respeito ao modo de funcionamento isolado, o VSI trabalha como uma fonte de tensão com magnitudes e frequência controladas pela potência ativa e reativa aos seus terminais. As medições de tensão e frequência efetuadas aos terminais da unidade VSI são comparadas com valores de referência pré-determinados. Se a tensão ou frequência medida estiver abaixo ou acima do valor de referência, é efetuada injeção ou absorção de potência reativa ou ativa respetivamente. A quantidade de potência injetada ou absorvida perante determinado desvio de tensão/frequência é definida pelos parâmetros de controlo associados à unidade VSI. Este tipo de controlo designa-se como *droop control*.

As MF existentes apresentam características e capacidades diferentes entre si, no que diz respeito à possibilidade de participar na regulação de tensão e frequência da MR. As fontes podem assim ser classificadas da seguinte forma:

- **Unidades de formação da rede** – As unidades de formação de rede definem a tensão e frequência da rede, uma vez que são capazes de equilibrar produção e consumo de forma rápida. Usualmente existe uma única unidade deste género na rede (por exemplo, unidades VSI e dispositivos de armazenamento de energia);
- **Unidade de suporte da rede** – É possível controlar a potência ativa e/ou reativa das unidades de suporte de rede. Essa potência é determinada com base na frequência e

tensão na rede. Deste modo, estas unidades participam na regulação de tensão e frequência, ainda que não tenham capacidade para o fazer isoladamente (exemplo: microturbinas);

- **Unidades de paralelo à rede** – as unidades de paralelo à rede são incontroláveis, ou parcialmente incontroláveis (por exemplo, painéis FV ou micro-eólicas). Por esta razão são geralmente operadas de forma a injetar a máxima potência na rede.

Seguidamente apresentam-se estratégias de controlo de uma MR tendo em conta as tecnologias de eletrónica já referidas, a controlabilidade e características de cada tipo de MF. Estas estratégias designam-se por *Single Master Operation* (SMO) e *Multi Master Operation* (MMO) [4]. Nos seguintes parágrafos é descrito o funcionamento de cada uma destas estratégias:

- **Single Master Operation** – Esta estratégia apenas considera um inversor VSI na topologia da rede. Este poderá ser ligado a uma MF com o suporte de um dispositivo de armazenamento de energia ou estar afeto apenas ao segundo. Todas as outras MF são operadas por inversores PQ. O VSI faculta referência de tensão e frequência para a atuação dos inversores PQ, quando a MR se encontra em modo isolado. O MGCC tem como responsabilidade, obedecendo à informação recolhida pelos controladores locais, atualizar os *set points* dos inversores PQ, de modo a atingir um cenário ideal de operação. Para além dessa função tem ainda a responsabilidade de eventuais deslastes de cargas necessárias e ligação de cargas prioritárias. Na Figura 6 apresenta-se um esquema de SMO.

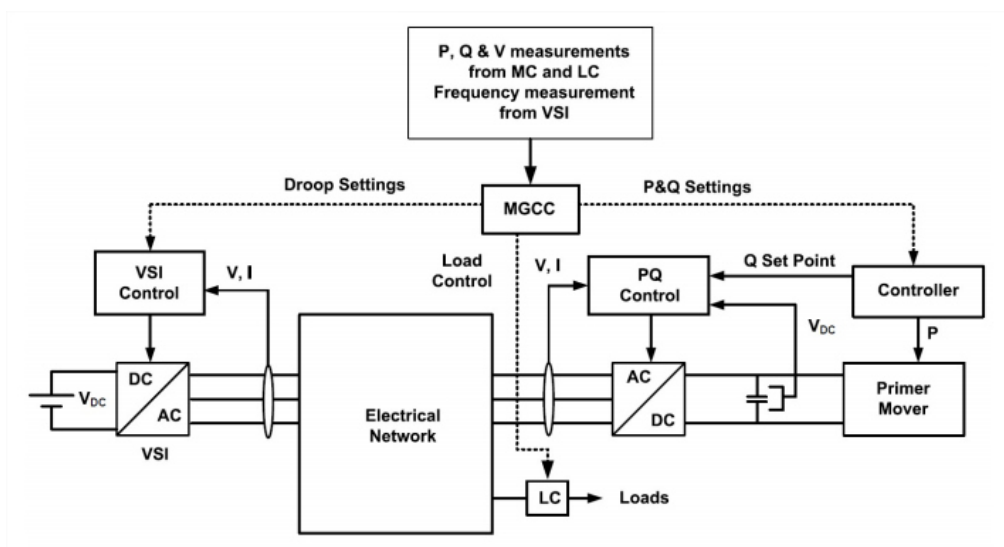


Figura 6 – Esquema de controlo *Single Master Operation*

- **Multi Master Operation** – Esta estratégia de controle é semelhante à anterior, diferenciando-se essencialmente na medida em que divide a tarefa de controlar a tensão e frequência por duas unidades VSI conforme esquema da Figura 7. Tal como na estratégia SMO, as restantes MF são operadas por inversores PQ. A estratégia MMO torna-se assim uma estratégia mais robusta e fiável, uma vez que a MR tem mais do que uma MF controlável a disponibilizar os níveis de tensão e frequência pretendidos. Na eventualidade de dotar a MR de capacidade de reposição de serviço a estratégia MMO é essencial.

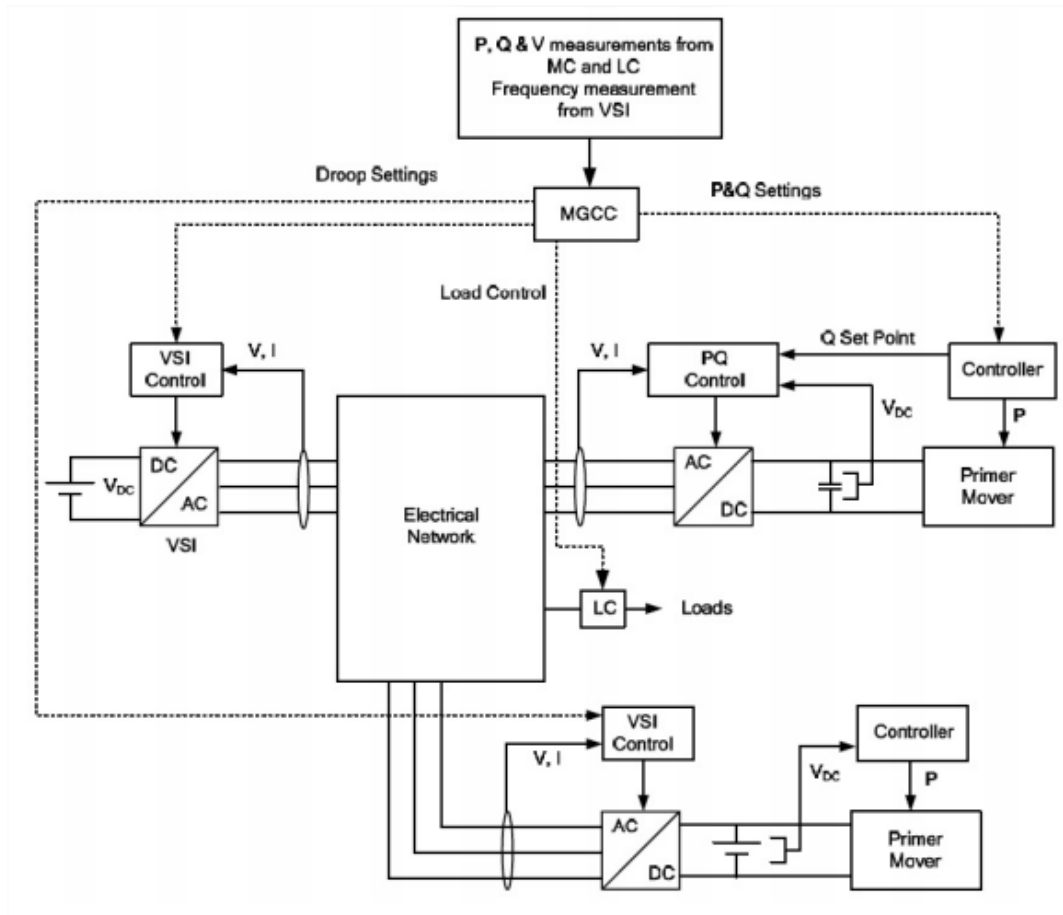


Figura 7 – Esquema de controlo *Multi Master Operation*

A capacidade de preservar o balanço energético entre produção e consumo numa MR em modo isolado exige a presença de um ou mais inversores VSI dependendo da estratégia utilizada (SMO ou MMO). A estes inversores deve estar associado um dispositivo de armazenamento de energia, capaz de compensar rapidamente a diferença entre produção e consumo aquando de uma perturbação no equilíbrio energético da MR. O desequilíbrio energético pode ter diversas causas: o período transitório entre o modo interligado e o

modo isolado, a variação de produção de uma MF ou o ligar/desligar de uma carga na MR. Os equipamentos de armazenamento de energia apenas devem debitar/absorver potência em situações transitórias, como as indicadas. Ainda assim, se o valor da frequência ou da tensão da rede estabilizar num valor diferente do nominal (causado pela utilização de controladores proporcionais no *droop control* das unidades VSI, com erro em regime permanente associado), estes dispositivos continuam a sua injeção/absorção de potência. Esta situação não é aceitável uma vez que os referidos dispositivos têm uma capacidade de armazenamento limitada, o que lhes demarca a capacidade de injetar/absorver potência durante longos intervalos de tempo. Para que esta situação seja retificada é necessário assegurar um controlo secundário capaz de corrigir desvios em regime permanente no que diz respeito ao valor nominal das grandezas referidas. Para corrigir estes desvios recorrem-se a controladores PI (*proporcional-integral*) em cada MF controlável (habitualmente utilizam-se microturbinas ou pilhas de combustível) [4].

O deslastre de cargas pode também ser um dos caminhos no que diz respeito ao controlo das condições de funcionamento da MR em situações transitórias. Na eventualidade da carga ser superior à produção um sistema de deslastre de carga pode ser implementado de maneira a ajudar a MR a restaurar os valores nominais de frequência. A percentagem de carga temporariamente deslastrada permite que os geradores com capacidade de regulação reajam aos desvios de frequência sem prejuízo da estabilidade da MR. Posteriormente, caso haja condições para tal, a carga pode ser religada novamente e alimentada pela MR.

3.5 – Tecnologias de geração, controlo e comunicações

3.5.1 – Tecnologias de geração

Como se sabe, existem diversas tecnologias de micro geração passíveis de serem utilizadas na PD. No caso específico das MR e da MF as tecnologias mais utilizadas encontram-se listadas seguidamente:

- Solar fotovoltaico;
- Micro eólicas;
- Microturbinas;

- Pilhas de combustível.

A- Solar fotovoltaico

Uma célula solar ou célula fotovoltaica (Figura 8) trata-se de um equipamento eléctrico com a capacidade de converter directamente a energia solar em energia eléctrica por acção do efeito fotovoltaico.



Figura 8 – Célula fotovoltaica [5]

Usualmente, estes dispositivos são compostos por um material semicondutor, geralmente silício, e as suas características e rendimento variam de acordo com as características desse material. Uma célula FV tem capacidade para gerar uma tensão em circuito aberto entre os 0,5V e 1,0V e uma corrente de curto-circuito de algumas dezenas de miliamperes por cm^2 . Uma vez que estes valores são bastante reduzidos para a generalidade das aplicações, recorre-se à junção de diversas células FV em paralelo e em série de acordo com os valores de tensão e corrente pretendidos. O conjunto de células FV designa-se por painel fotovoltaico. Nalguns casos é possível ainda a agregação de painéis fotovoltaicos, resultando dessa junção a chamada matriz de painéis (Figura 9).

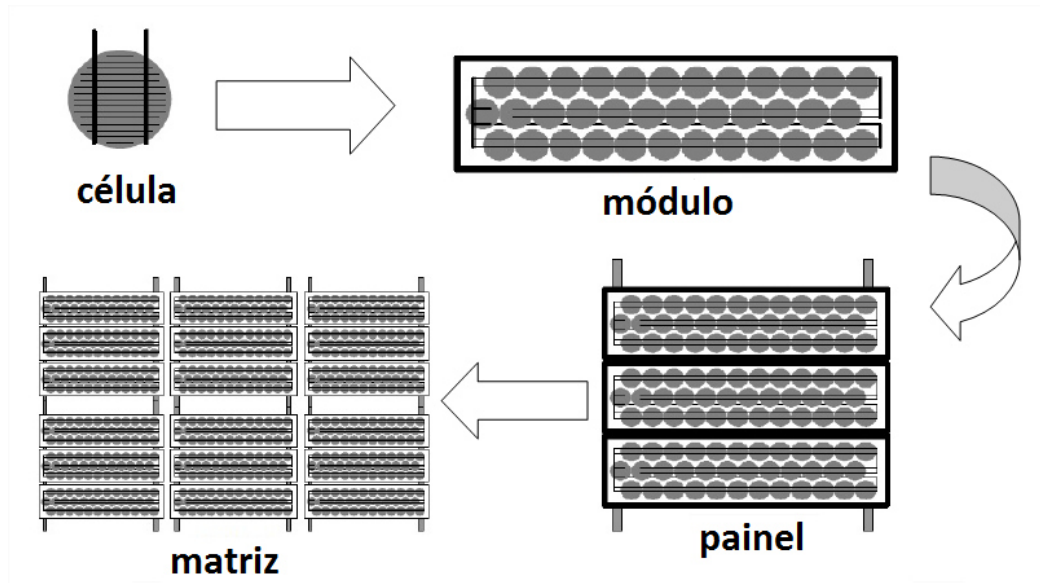


Figura 9 – Configurações possíveis da célula fotovoltaica [4]

Existem diversas tecnologias de células fotovoltaicas, seguidamente estão enunciadas as principais tecnologias utilizadas atualmente [4]:

- **Silício cristalino** - É a tecnologia mais utilizada no mercado atualmente com uma participação de 95% do mercado de células fotovoltaicas. Atualmente, apresenta um rendimento de 15% a 21% em suas células. Os painéis solares feitos de células de silício cristalino apresentam um rendimento de 13% a 17%.
- **Silício amorfo** – Tem uma participação de 3,7% do mercado de células fotovoltaicas, e o seu rendimento é de cerca de 7%
- **CIGS** – Nome comercial, para células de filme fino, produzidas com Cu (In,Ga) Se₂. A sua participação no mercado é de 0,2% e o rendimento ronda os 13%. Atualmente, existem problemas como o abastecimento de índio para o seu fabrico, uma vez que 75% de todo o consumo do material do mundo é aplicado na produção de monitores de tela plana como LCD's e monitores de plasma.
- **Arsenieto de gálio** – Trata-se da tecnologia mais eficiente utilizada em células solares na atualidade, com rendimento próximo dos 28%. No entanto, o seu custo de fabrico é muito alto, tornando impraticável a produção comercial sendo aplicado unicamente em painéis solares de satélites artificiais.

- **Telureto de cádmio** - Participação de 1,1% do mercado de células fotoelétricas e é uma tecnologia que utiliza filmes finos de telureto de cádmio. Apresenta pouco apelo comercial em consequência da alta toxicidade do cádmio.

Os sistemas FV apresentam a possibilidade de poderem funcionar ligados à rede (Figura 10), ou em modo isolado. Nos sistemas fotovoltaicos com ligação à rede, é possível potenciar uma integração bi-direcional com a mesma. Ou seja, caso a produção supere o consumo exigido pelas cargas o excesso é entregue à rede elétrica. Em sentido oposto, na eventualidade de haver mais carga do que produção o painel direciona toda a energia produzida para as cargas.

Para além da hipótese levantada no parágrafo anterior, existe a opção da instalação de baterias com a função de armazenar energia em caso de falha da rede. Numa situação normal as baterias estão totalmente carregadas, funcionando apenas na eventualidade de ocorrer um colapso na rede. Caso isso aconteça, o painel em associação com as baterias poderá suportar o fornecimento de energia às cargas durante um determinado período de tempo.

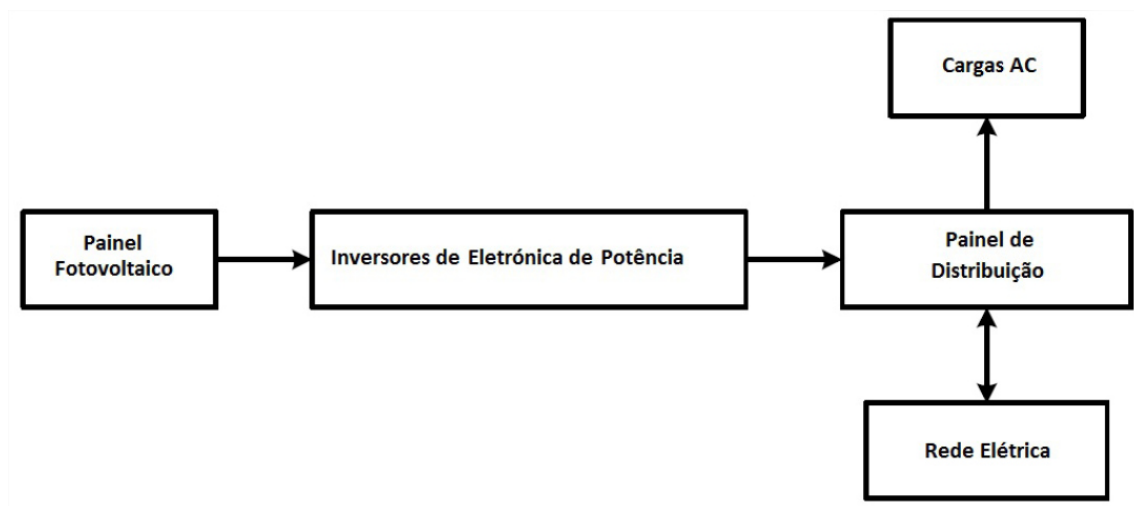


Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema FV ligado à rede [4]

B – Micro eólicas

As turbinas eólicas são usadas há várias décadas, atualmente representam já uma parte significativa da produção energética a nível mundial. A nível nacional existiam cerca de

5000 MW de potência instalada em 2015 de acordo com a informação da DGEG/APREN [6] e da rede eléctrica nacional. Este valor colocava Portugal entre os primeiros dez países do mundo neste setor, superando países pioneiros, nomeadamente a Dinamarca e a Espanha. A inovação no sector eólico contempla não apenas as turbinas instaladas em terra mas também a eólica *offshore* e as microturbinas eólicas (Figura 11).



Figura 11 – Turbinas eólicas (direita: instaladas em terra; esquerda: offshore) [7][8]

No âmbito da MR e PD faz todo o sentido o estudo das micro-eólicas uma vez que é cada vez mais habitual este tipo de MF. As MF apresentam usualmente potências na ordem das dezenas de kW. Ainda assim, é frequente haver uma subclassificação ao nível da dimensão e da orientação do rotor.

Na Tabela 5 apresenta-se a subclassificação das mesmas tendo em conta a dimensão do rotor proposta na norma IEC 61400-2 e a subclassificação no que diz respeito à potência nominal usualmente aplicada no sector [4].

Tabela 5 – Sub-classificação de pequenas turbinas eólicas

Sub-Classe	Diâmetro do rotor [m]	Potência nominal [kW]	Aplicações
Microturbina	$D < 1,6 \text{ m}$	$< 5 \text{ kW}$	Domésticas
Mini-turbina	$1,6 \text{ m} < D < 5 \text{ m}$	$5 < P < 50 \text{ kW}$	Urbanizações e pequenas empresas
Pequena Turbina	$5 \text{ m} < D < 16 \text{ m}$	$50 < P < 500 \text{ kW}$	Grandes urbanizações e PME's de consumo significativo

No que diz respeito à orientação do rotor, as microturbinas podem classificar-se como tendo eixos de rotação horizontais (HAWT) ou verticais (VAWT). Maioritariamente utilizam-se as turbinas HAWT por apresentarem uma eficiência superior. Efetivamente, a eficiência máxima de uma turbina VAWT é de cerca de 80% da eficiência máxima de uma turbina HAWT.

Uma vez que a velocidade do vento não é sempre constante torna-se impossível assegurar uma frequência constante de 50 Hz da parte da microturbina eólica e isto leva a que seja necessário recorrer a uma interface de eletrónica de potência. Caso seja necessário garantir as características adequadas da energia entregue à rede ou às cargas, essa interface torna-se indispensável.

C – Microturbinas

As microturbinas são pequenas turbinas de combustão que possuem uma potência nominal compreendida entre os 25 kW e os 400 kW (Figura 12).

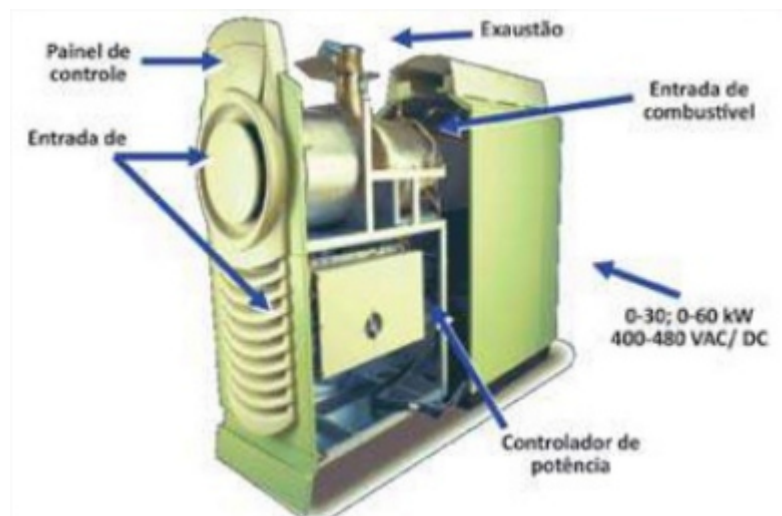


Figura 12 – Microturbina a Gás [9]

Estes equipamentos apresentam algumas vantagens importantes quando comparadas com outras tecnologias de MF. Uma dessas vantagens relaciona-se com o facto da dimensão e peso serem diminutos por unidade de potência produzida, o que conduz a um menor custo de instalação. Para além disso uma vez que possui poucas partes móveis (ou seja, menor frequência de manutenção) é pouco ruidoso, e pode funcionar em regime de cooperação e

ser alimentado por diferentes combustíveis (gasóleo, gás natural, querosene e gás propano), são vantagens a ter em consideração.

Também a nível ambiental, estes equipamentos apresentam vantagens. No que diz respeito a emissões de gases poluentes as emissões são mais reduzidas e a sua eficiência energética é superior. A rede elétrica beneficia igualmente com o uso das microturbinas, uma vez que possibilitam o fornecimento de energia elétrica em pontos mais isolados do SEE, adiando investimentos avultados em infraestruturas de distribuição. Trata-se de um elemento-chave no que concerne às MR sendo que confere capacidade de controlo e autonomia de produção às mesmas.

O funcionamento das microturbinas é baseado no Ciclo Termodinâmico de Brayton [4]. Nas microturbinas, o ar que entra é comprimido num compressor e pré-aquecido no recuperador fazendo uso do calor libertado pelos gases de escape da turbina. Após aquecido, o ar no recuperador este mistura-se com o combustível na câmara de combustão onde é queimado. O gás quente proveniente da combustão é então libertado sobre as pás da turbina, originando energia mecânica que ativa o gerador para produzir energia elétrica. Opcionalmente, pode ser utilizado o recuperador aumentando substancialmente a eficiência da microturbina (de 15% para 30%). Uma vez que a maioria das microturbinas gera correntes AC a altas frequências torna-se necessária uma conversão AC/DC e novamente DC/AC para garantir que se entrega energia elétrica com características idênticas às da rede (Figura 13). Este exercício exige dispositivos de eletrónica de potência bastante eficientes e robustos.

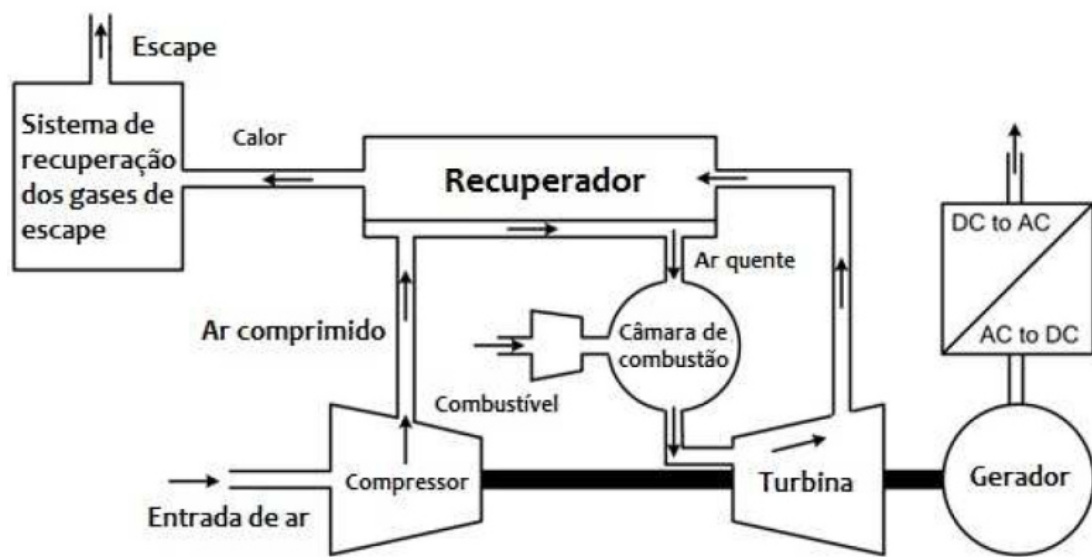


Figura 13 – Esquema de funcionamento de uma microturbina de um veio

São possíveis duas configurações possíveis para as microturbinas. As *Single-Shaft* de um veio, ou as *Split Shaft* de dois veios.

No que diz respeito à configuração de um veio (*Single-Shaft*), o compressor, a turbina e o gerador repartem um veio em comum que roda a velocidades muito elevadas (entre 50000 rpm e 120000 rpm). A sua característica de funcionamento a velocidades elevadas possibilita suportar variações de carga não comprometendo os elevados níveis de eficiência e preservando uma grande fiabilidade a longo prazo. É importante também sublinhar que no arranque o gerador funciona como motor, de maneira a permitir elevar a velocidade de rotação da microturbina para o valor necessário ao seu funcionamento. De modo a que tal aconteça o motor precisa de ser alimentado de forma externa, para tal pode recorrer-se à rede ou a baterias no caso de se tratar de um sistema a funcionar em regime isolado.

Na configuração de dois veios (*Split-Shaft*) o compressor encontra-se emparelhado a um veio enquanto o gerador está ligado a um segundo veio. Assim sendo, existem duas turbinas associadas respetivamente ao compressor e ao gerador. As microturbinas *Split-Shaft* caracterizam-se por funcionar a velocidades mais baixas podendo ser usado um desmultiplicador de velocidade para fazer a ligação à rede.

Tabela 6 – Comparação entre microturbinas de um veio e dois veios

Tecnologia	Vantagem	Desvantagem
Um Veio	<ul style="list-style-type: none"> -Menos peças móveis -Caixa de velocidades desnecessária -Funcionamento mais silencioso 	<ul style="list-style-type: none"> -Compromisso entre as necessidades eléctricas da turbina e de uma carga eléctrica bem definida
Dois Veios	<ul style="list-style-type: none"> -Flexibilidade em combinar a turbina e a carga eléctrica exigida -Esforços mecânicos mais reduzidos -Maior tempo de vida útil 	<ul style="list-style-type: none"> -Mais peças móveis -Necessidade de caixa de velocidades -Custo superior associado

D – Pilhas de combustível

As pilhas de combustível têm por base uma tecnologia de produção de energia que se resume em células eletroquímicas. Estas produzem energia eléctrica por meio da energia química recorrendo a reacções oxidação-redução. A variedade de combustíveis que pode ser usada é grande e varia entre gás natural, propano, gasóleo, metanol ou hidrogénio.

Apesar do baixo estado de maturação desta tecnologia e da fraca projecção de mercado a nível comercial (o que a torna uma tecnologia cara), conta já com algumas vantagens interessantes as quais se enunciam no parágrafo seguinte.

No que diz respeito ao nível ambiental trata-se de uma energia extremamente limpa uma vez que não envolve combustão, e o seu uso não implica emissões de gases poluentes. Quanto à eficiência, as pilhas de combustível podem alcançar rendimentos próximos dos 60% o que é aproximadamente o dobro dos valores atingidos em motores típicos de combustão interna [4]. Relativamente à sua operação, e em especial no que se refere à sua capacidade de seguimento de carga (*load-following*), as células de combustível são capazes de acompanhar as variações de cargas sem prejuízo económico devido à reduzida variação da sua eficiência com o respetivo nível de carga. Uma vez que assentam em processos

eletroquímicos para a produção de energia, as pilhas de combustível são lentas a modificar o seu regime de produção e consequentemente a responder a variações súbitas de carga. Esta limitação faz com que esta tecnologia não seja apropriada para responder a variações de carga muito frequentes, sendo mais indicada para usar como unidade de base no diagrama de cargas. As suas características e a capacidade de arrancar de forma autónoma tornam as pilhas de combustível uma excelente opção no que diz respeito à operação das MR particularmente em modo isolado.

Do ponto de vista operacional a célula eletroquímica é composta por ânodo, cátodo e eletrólito (Figura 14). O ânodo gera uma interface entre o combustível e o eletrólito, proporcionando um caminho pelo qual os eletrões livres são encaminhados à carga através de um circuito externo. O processo global divide-se em dois passos: a oxidação no ânodo e redução no cátodo. Como resultado desta reação química resulta um subproduto que é a água líquida [4].

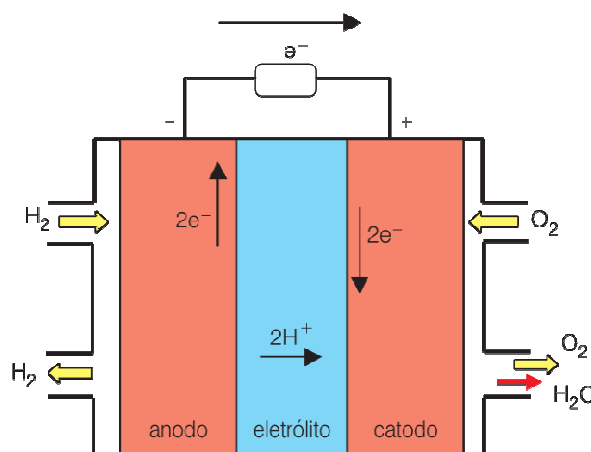


Figura 14 – Composição de uma pilha de combustível [10]

3.5.2 – Tecnologias de armazenamento

Para além dos micro-geradores, também os dispositivos de armazenamento de energia são parte importante da arquitetura de uma MR. Tal como já foi referido a MR tem a aptidão de funcionar em modo isolado, para tal, é imprescindível a existência de um sistema de armazenamento de energia para garantir o equilíbrio energético inicial. No momento do funcionamento em modo isolado os dispositivos de armazenamento de energia possuem a capacidade de compensar a perda de potência causada pelo súbito desligar da rede. Acresce

a estes dispositivos a capacidade de absorver a energia e não se limitando a fornecer. Esta característica é muito importante, na medida em que nos casos em que a carga é inferior à produção, assegura que o equilíbrio entre ambas seja mantido sem necessidade de deslastrar carga. Os equipamentos mais usados são os seguintes:

- Baterias;
- Supercondensadores;
- Volantes de inércia (*flywheels*).

A – Baterias

Assume-se que a bateria seja uma fonte de tensão constante com um valor fixo para a quantidade de energia que pode armazenar. A transmissão de energia é realizada em modo de DC. A autonomia da bateria depende da quantidade de corrente que esta é obrigada a fornecer. Quanto maior for a solicitação de corrente menos tempo durará a bateria até se descarregar.

A base do funcionamento da bateria são as reações eletroquímicas de oxidação-redução. Quando a bateria se encontra ligada a uma carga externa, os eletrões livres gerados na reação de oxidação-redução transportam-se do ânodo para o cátodo, percorrendo e alimentando a carga. Em sentido inverso, ou seja, no processo de carregamento da bateria passa a ocorrer a redução no ânodo e oxidação do cátodo [4].

O ponto fraco das baterias é durabilidade. A sua durabilidade está relacionada com o número de ciclos de carga/descarga a partir dos quais as suas características e capacidade ficam irreversivelmente afetadas. Isto sucede devido ao tipo de reações químicas que ocorrem aquando do processo de geração de energia. Nesse processo, vão acontecendo alterações a nível molecular na constituição de determinados componentes e os eletrólitos vão sendo danificados, diminuindo assim o tempo de vida útil das baterias.

De referir que a durabilidade das baterias é mais afetada quando os ciclos de descarga são completos, ou seja, quando a bateria é descarregada na totalidade. Assim sendo, as aplicações em que são usadas devem evitar esta situação.

B – Supercondensadores

Os supercondensadores tratam-se da última inovação a nível tecnológico no que diz respeito ao armazenamento de energia. Na Figura 15 apresenta-se a estrutura típica e composição desta tecnologia.

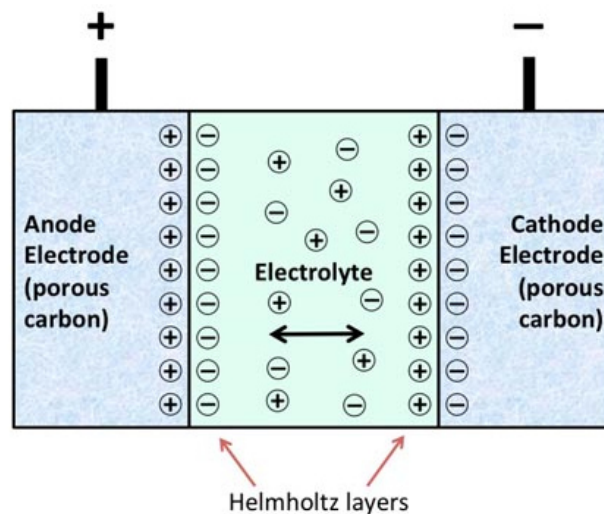


Figura 15 – Composição de um supercondensador eletroquímico [11]

As vantagens desta tecnologia passam pela capacidade de mitigar o impacto de aumentos repentinos de carga na rede de distribuição e de fornecer grandes valores de corrente de forma rápida. Quando comparados com as baterias e com os condensadores convencionais, os supercondensadores possuem uma densidade energética maior apesar do seu tamanho e peso serem inferiores. Para além destas vantagens, os supercondensadores têm também um tempo de vida útil bastante superior (>10000 ciclos) com a atenuante de que este não é afetado pelo grau de descarga a que são submetidos. A sua eficiência energética ronda os 90 %.

Do ponto de vista operacional, os supercondensadores apresentam um funcionamento semelhante ao das baterias. Têm dois elétrodos imersos numa solução eletrolítica. Uma vez que recorre a materiais porosos nos elétrodos (carbono) e uma solução eletrolítica líquida, a superfície de contacto é superior comparativamente com os condensadores mais habituais, aumentando a capacidade.

C – Volantes de inércia

Outra das tecnologias de armazenamento de energia é o volante de inércia. Esta tecnologia armazena energia cinética numa massa em rotação (Figura 16). Podem ser usados em aplicações onde se utilizam baterias convencionais. Não obstante, a utilização de volantes de inércia tem bastantes vantagens quando comparados com outros equipamentos do mesmo tipo, tais como as baterias. O tempo de vida útil, a densidade energética e a capacidade de sofrer contínuos ciclos de descarga completa, fazem deste dispositivo uma boa solução para o armazenamento de energia. Para além do já referido, esta tecnologia apresenta outra vantagem que se prende com a facilidade de monitorização e controlo o que é importante no contexto das MR e em que é indispensável a monitorização em tempo real.

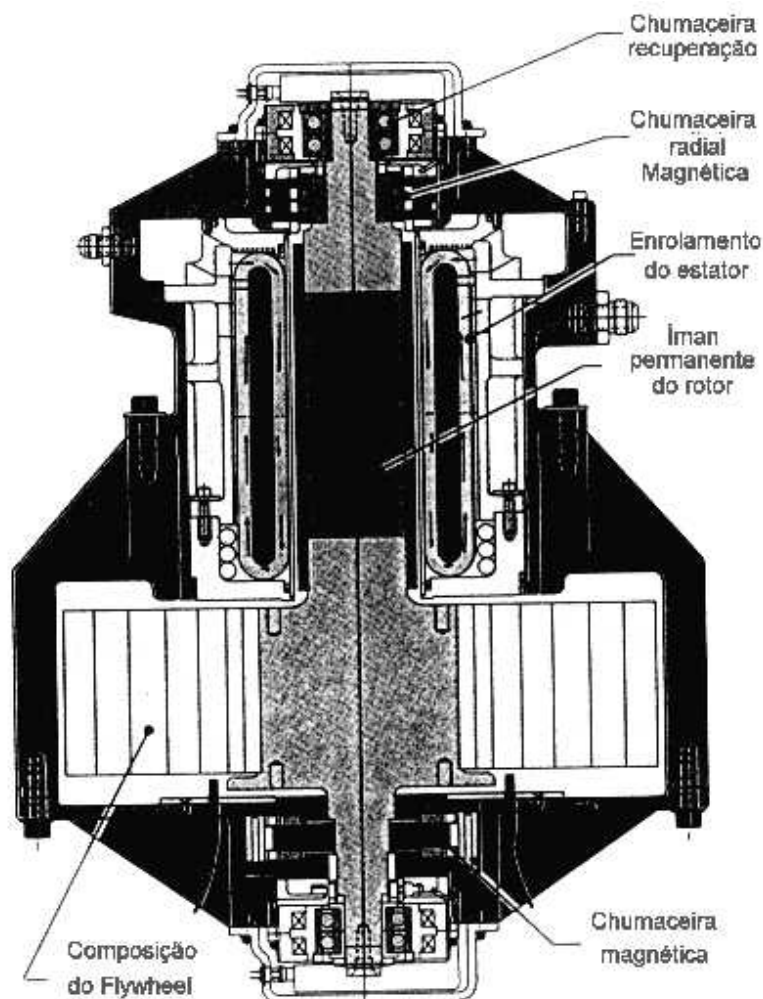


Figura 16 – Constituição de um volante de inércia [12]

Num volante de inércia a massa em rotação na qual se encontra acumulada a energia cinética, está ligada a um gerador síncrono de ímanes permanentes com velocidade variável, que pode funcionar como motor ou gerador. Caso funcione como motor a sua função é acelerar a massa rotativa de modo a que esta armazene mais energia cinética (equivalente ao ciclo de carga de uma bateria). Caso funcione em modo gerador a sua função é absorver a energia cinética armazenada e transformá-la em energia eléctrica, o que provoca uma diminuição da velocidade de rotação da massa e por consequente a diminuição da quantidade de energia armazenada no volante.

Uma vez que a frequência de saída do gerador é variável, torna-se necessária uma interface de electrónica de potência de modo a converter a frequência para os valores pretendidos.

4.- Exposição do *Software* PSS/E

Neste capítulo damos início a uma componente mais prática da presente tese. O que se pretende é apresentar as potencialidades do *software* de cálculo utilizado nas diversas simulações sobre uma determinada microrrede, a qual será explorada mais à frente nesta tese.

Como tal, para efetuar as simulações necessárias a este trabalho, recorreu-se ao *software* PSS/E (*Power System Simulator for Engineering*) da Siemens, que consiste num programa informático de elevado desempenho orientado para aplicações em sistemas de potência [13].

Seguidamente apresentam-se com mais detalhe alguns pontos referentes a este *software*.

A – Arquitetura do PSS/E – simulações de fluxo de potência, curto-circuitos e dinâmica

A *Siemens Power Technologies Internacional* (Siemens PTI) é um fornecedor de serviços de consultoria nas áreas de estudos eléctricos, soluções de *software* e *training*. O *software* PSS/E trata-se de um programa integrado que possibilita simulações de fluxos de potência, curto-circuitos e dinâmica num ambiente integrado, bem como um excelente ambiente de automação baseado em *scripts* Python, permitindo assim o controlo por parte do utilizador e personalização de resultados.

As ferramentas de planeamento e análise de sistemas de transmissão são essenciais para que as concessionárias de energia enfrentem os desafios de engenharia das redes atuais e das redes inteligentes do futuro. Acompanhando a procura de energia nas melhores condições técnicas/económicas e as redes complexas em constante expansão, os serviços públicos dependem de poderosas ferramentas para criar sistemas que satisfaçam as necessidades previstas.

O PSS/E oferecido pela Siemens PTI é uma ferramenta poderosa e de fácil utilização na análise de redes de sistemas elétricos que vai além da tradicional simulação de fluxo de potência para proporcionar a capacidade de otimizar e aperfeiçoar totalmente um sistema de transmissão. O PSS/E oferece tecnologia comprovada em inúmeras experiências sendo, ainda assim; flexível e adaptável por parte do utilizador a regulamentos e procedimentos em constante alteração.

O pacote de programas do PSS/E incorpora anos de experiência da Siemens PTI no desenvolvimento de algoritmos e foi aperfeiçoado em estreita colaboração com os seus utilizadores em todo o mundo. Com este histórico, tornou-se um dos mais utilizados programas de planeamento de transmissão elétrica. O PSS/E oferece aos utilizadores poderosas análises de fiabilidade e utiliza os mais recentes algoritmos numéricos e tecnologia informática para solucionar desafios de redes de pequenas ou grandes dimensões de forma eficiente.

O PSS/E é uma das ferramentas mais modernas no que diz respeito a novas funcionalidades e funcionalidades analíticas, satisfazendo as necessidades atuais e futuras de utilizadores em todo o mundo.

As funcionalidades de análise do PSS/E incluem:

- Fluxo de potência;
- Análise de contingências;
- Contingências probabilísticas;
- Simulação dinâmica;
- Curtos circuitos.

Os módulos opcionais proporcionam:

- Fluxo de potência ótimo;
- Análise de estabilidade de pequenos sinais;

- Construtor gráfico de modelos.

B – Vantagens do PSS/E

Os benefícios do uso da aplicação PSS/E são enumerados seguidamente:

- Simulações rápidas, poderosas e testadas em condições reais de até 150000 barramentos;
- Moderna interface gráfica de utilizador (GUI);
- Análise de defeitos simétricos e assimétricos, análise de contingências (determinística e probabilística);
- Funcionalidade de automação e personalização – comandos BAT, Python, PSAS;
- Subsistemas definidos pelo utilizador – subsistemas baseados em áreas, proprietários, zonas, tensão do barramento ou combinações;
- Biblioteca abrangente de modelos incluindo tecnologias emergentes como avançados dispositivos FACTS e turbinas eólicas;
- Construção de modelos com base em código escrito pelo utilizador;
- Construção gráfica de modelos de controlador definidos pelo utilizador;
- Análise de pequenos sinais.

O PSS/E é uma ferramenta que pode lidar com os principais problemas de fiabilidade em sistemas eléctricos, incluindo:

- Análise de contingências múltiplas (N-1-1; N-2; N-1, N-1);
- Análise de vulnerabilidade de falhas em cascata;
- Aplicação automática de estratégias de mitigação;
- Desenvolvimento de índices de fiabilidade probabilística.

O PSS/E permite também a simulação de todos os tipos de defeitos simples e complexos, incluindo:

- Defeitos trifásicos;
- Defeitos fase-terra, Defeitos bifásicos-terra, Defeitos fase-fase;
- Cálculos de acordo com a norma IEC 60909 (esta norma é aplicável no cálculo de correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos em baixa e alta tensão AC que operem a 50 Hz ou 60 Hz);
- Cálculos de acordo com a norma ANSI;

O programa permite ainda uma rápida expansão de conteúdo analítico:

- Incorporação das principais melhorias analíticas;
- Informação atualizada acerca de requisitos regulamentares de fiabilidade;
- As ferramentas ideais para o estudo de novas tecnologias.

O *software* PSS/E é extremamente adequado para a resolução de desafios dos mais variados quadros regulamentares de sistemas elétricos, incluindo:

- Investigação de capacidade de transferência;
- Análise de colapso de tensão;
- Alocação de energia reativa;
- Avaliação de custos de oportunidade de serviço auxiliar;
- Avaliação de impactos;
- Análise de congestionamentos;
- Avaliação de custos marginais com base na localização.

Para além dos pontos já referidos o PSS/E é ainda líder no intercâmbio de dados padronizados, incluindo:

- Os conjuntos de dados PSS/E são abrangentes e incluem robustos modelos de planeamento;
- Estrutura de arquivos proprietária serve de padrão para intercâmbio em todo o mundo;
- Líder na implementação do intercâmbio de arquivos XML através de Common Information Model para uma maior precisão no intercâmbio de modelos em plataformas de fornecedores;
- Proporciona ferramentas para desenvolvimento de modelos personalizados pelo utilizador;
- Permite a execução de relatórios especificados pelo utilizador.

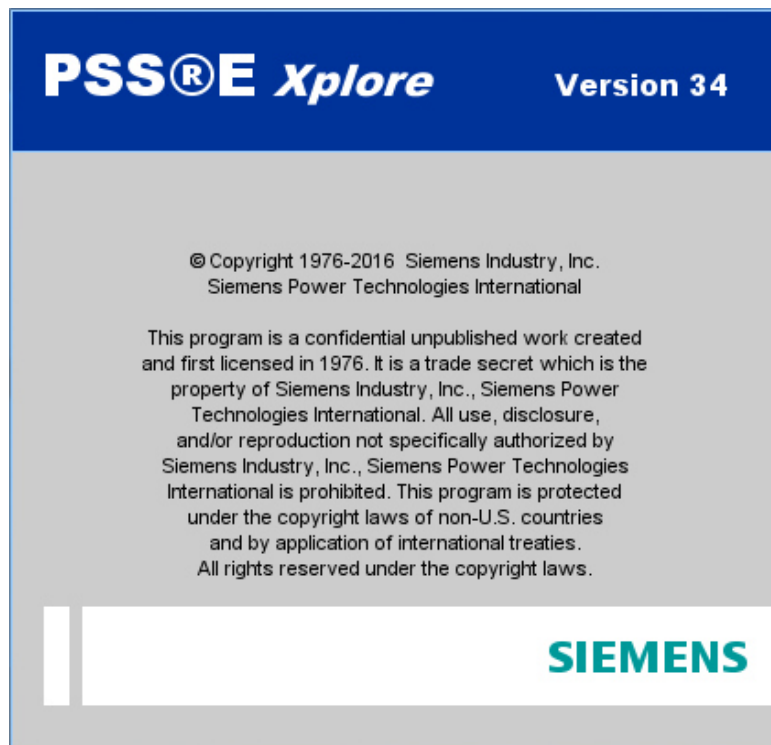


Figura 17 – PSS/E

C – Funcionalidades analíticas do PSS/E

O pacote de *software* Siemens PTI PSS/E é amplamente reconhecido como um dos programas comerciais mais repletos de funcionalidades, testados em termos de tempo e com melhor desempenho disponíveis para análise de sistemas eléctricos. Mais de 30 anos de uso comercial e melhorias sugeridas pelos utilizadores tornaram o pacote base de fluxo de potência PSS/E significativamente superior no que diz respeito a profundidade analítica, modelação e flexibilidade para o utilizador. Excelentes ferramentas gráficas permitem que o utilizador edite modelos e apresente resultados de forma fácil.

Fluxo de potência

Desde o seu lançamento, a precisão do fluxo de potência do PSS/E vem sendo comprovada comparativamente com respostas reais de sistemas e é a referência segundo a qual outros *softwares* são testados. Os algoritmos e modelos incluídos no PSS/E, e particularmente a sua flexibilidade para o utilizador, possibilita que qualquer tecnologia relevante nova e em desenvolvimento seja comprovada antes do seu lançamento na indústria.

A aceitação geral do PSS/E tem por base o facto de a Siemens PTI incorporar no PSS/E muitas técnicas de estudo utilizadas pelos consultores da Siemens PTI e pela comunidade de utilizadores. Assim, os utilizadores do PSS/E usufruem dos benefícios da experiência dos melhores engenheiros de planeamento de sistemas eléctricos em todo o mundo. Para além dos modelos e análises padrão proporcionados diretamente pelo PSS/E o utilizador pode desfrutar de funcionalidades de personalização da execução e da preparação e apresentação de resultados, recorrendo à poderosa linguagem de programação Python.

Curto-circuitos

O módulo de curto-circuitos possui diversos algoritmos de cálculo de curto-circuitos de modo a satisfazer diferentes necessidades de análise de defeitos. Todos os algoritmos encontram-se no PSS/E, em que o módulo necessita apenas de um caso funcional válido de fluxo de potência e os dados homopolares e inversos do sistema eléctrico. O módulo de curto-circuitos tem a capacidade de simular um ou todos os tipos de defeitos num barramento ou em todo o sistema ou em todos os subsistemas de uma vez, diminuindo

assim o tempo de análise. Para além disso, o PSS/E efetua análises de defeitos com base na norma IEC 60909. O único requisito prévio ao uso do método de cálculo de defeitos IEC é um caso funcional válido de fluxo de potência.

Os dados homopolares e inversores do sistema apenas são necessários se houver necessidade de simular defeitos assimétricos. A análise de curto-circuitos do PSS/E adequa-se na perfeição ao acompanhamento de trabalhos de coordenação de proteções.

Análise de contingências

Quando são realizadas análises de contingências no PSS/E estas podem ser especificadas automaticamente (por exemplo todas as contingências N-1) ou através de uma lista completa de contingências testadas e de contingências que tenham detetado violações. A funcionalidade “*Corrective Action*” (ação corretiva) do PSS/E pode então ser aplicada de modo a mitigar automaticamente violações de contingências e depois apresenta uma lista detalhada das violações mais sérias a resolver.

Contingências probabilísticas

A Siemens PTI apresenta uma análise abrangente de contingências probabilísticas de transmissão através de melhorias das principais formulações analíticas do *software* PSS TPLAN e da sua integração no PSS/E. As funcionalidades de contingências probabilísticas apresentam uma configuração fácil, modelação detalhada de esquemas de medidas corretivas, identificação eficaz de condições de colapso de tensão e tratamento automático de requisitos relativos à mobilização da produção e a perdas de carga. Estas funcionalidades combinadas proporcionam aos utilizadores do programa uma ferramenta completa para avaliar desempenhos de fiabilidade de transmissão em sistemas elétricos de pequenas ou grandes dimensões numa base determinística ou probabilística.

Simulação dinâmica

O módulo de simulação dinâmica do PSS/E é uma ferramenta versátil para investigar a resposta de sistemas a distúrbios que causam alterações significativas e repentinas no sistema elétrico. O módulo de simulação dinâmica proporciona uma vasta biblioteca de modelos testados incorporados para a modelização de diferentes tipos de equipamento e

também a capacidade de criação de modelos definidos pelo utilizador qualquer que seja a sua complexidade.

Os modelos de utilizador podem ser desenvolvidos com código Fortran ou pode ser usado o Construtor gráfico de modelos (GMB) para construir e testar graficamente diagramas de blocos de controlo para uso no PSS/E e noutros produtos PSS. Um pacote de exportação integrada permite que o utilizador especifique parcelas abrangentes e personalizáveis com capacidade de exportação para vários formatos gráficos populares.

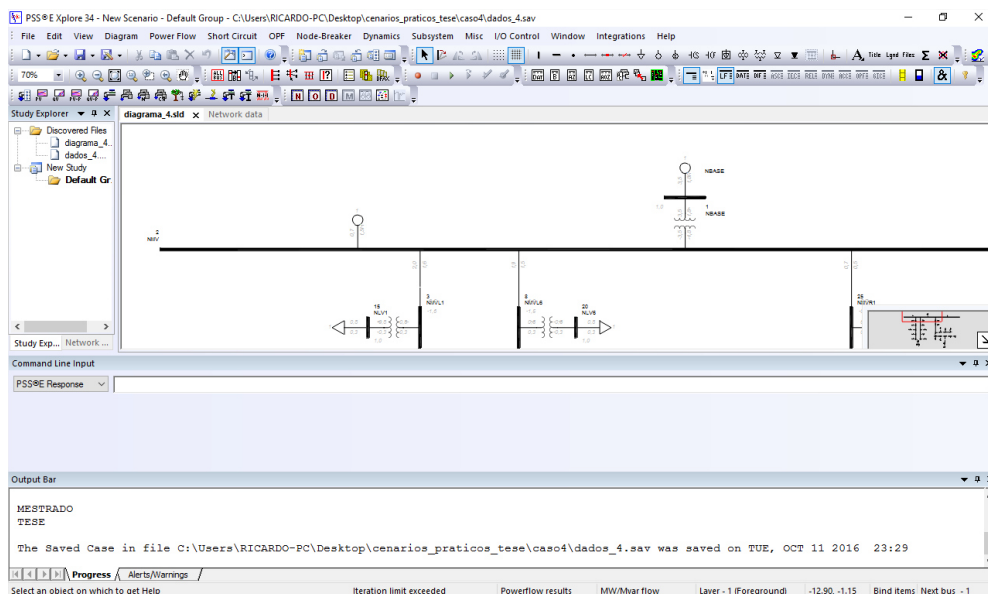


Figura 18 – Aspeto de uma janela do PSS/E

5 – Estudo prático de uma microrrede

Neste capítulo apresenta-se o estudo prático realizado a uma rede de distribuição integrando diversas microrredes. A rede elétrica de testes originalmente proposta tem o seguinte diagrama (Figura 19):

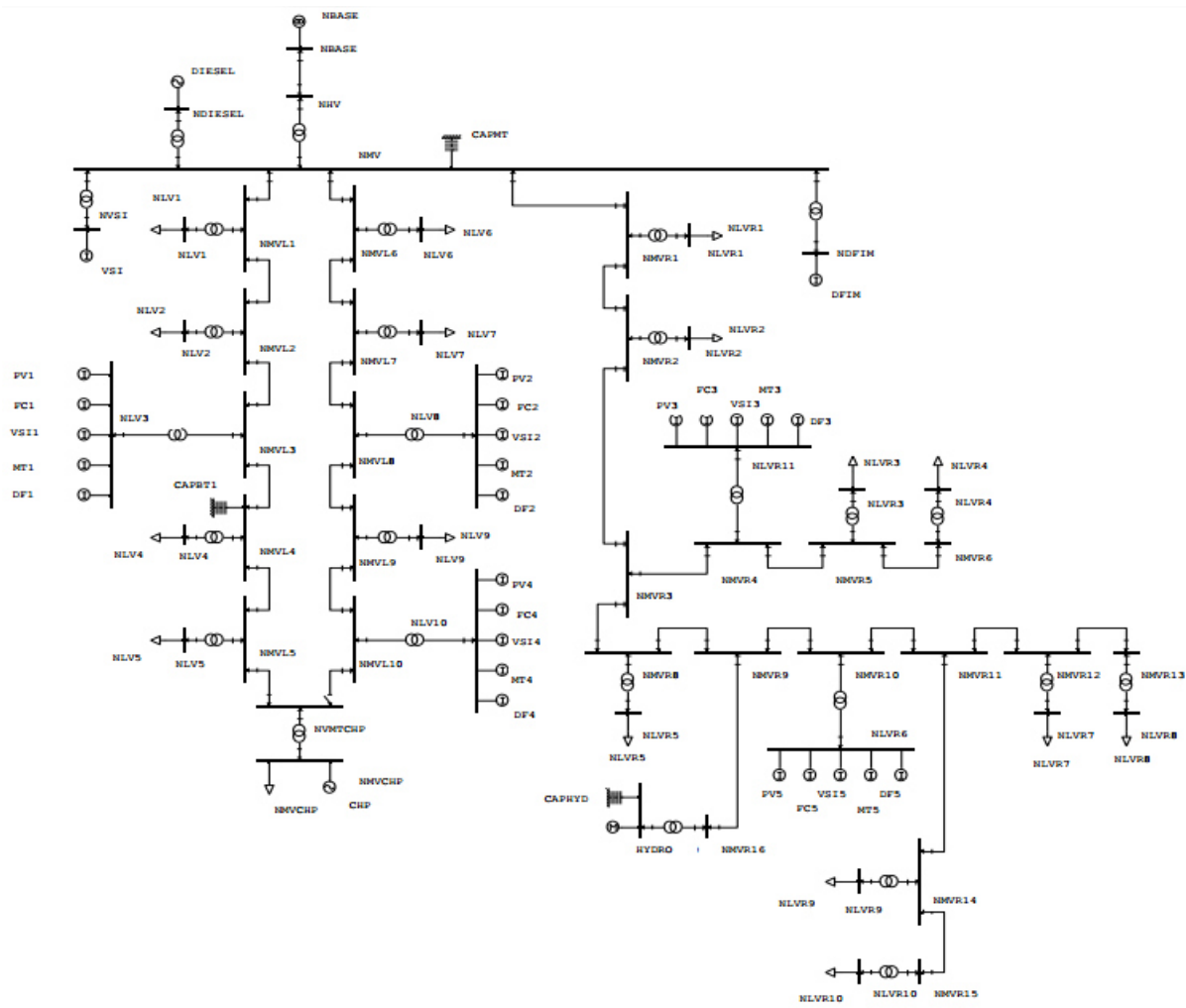


Figura 19 – Diagrama da rede de testes original [14]

Esta rede possui 55 barramentos interligados por 34 linhas e 21 transformadores. A alimentação das 17 cargas existentes é assegurada por uma subestação (NBASE), 5 pontos de produção dispersa (CHP, Hydro, Diesel, VSI, DFIM) e 5 microrredes. As microrredes estão representadas nos barramentos NLV3, NLV8, NLV10, NLVR6 e NLVR11.

No entanto, e uma vez que neste trabalho é usado o *software* PSS/E na versão educacional que tem diversas restrições entre as quais o número de barramentos possíveis (50) e o número de transformadores (20), foram necessários fazer alguns reajustes à rede de testes sendo que a sua versão final é representada seguidamente na Figura 20.

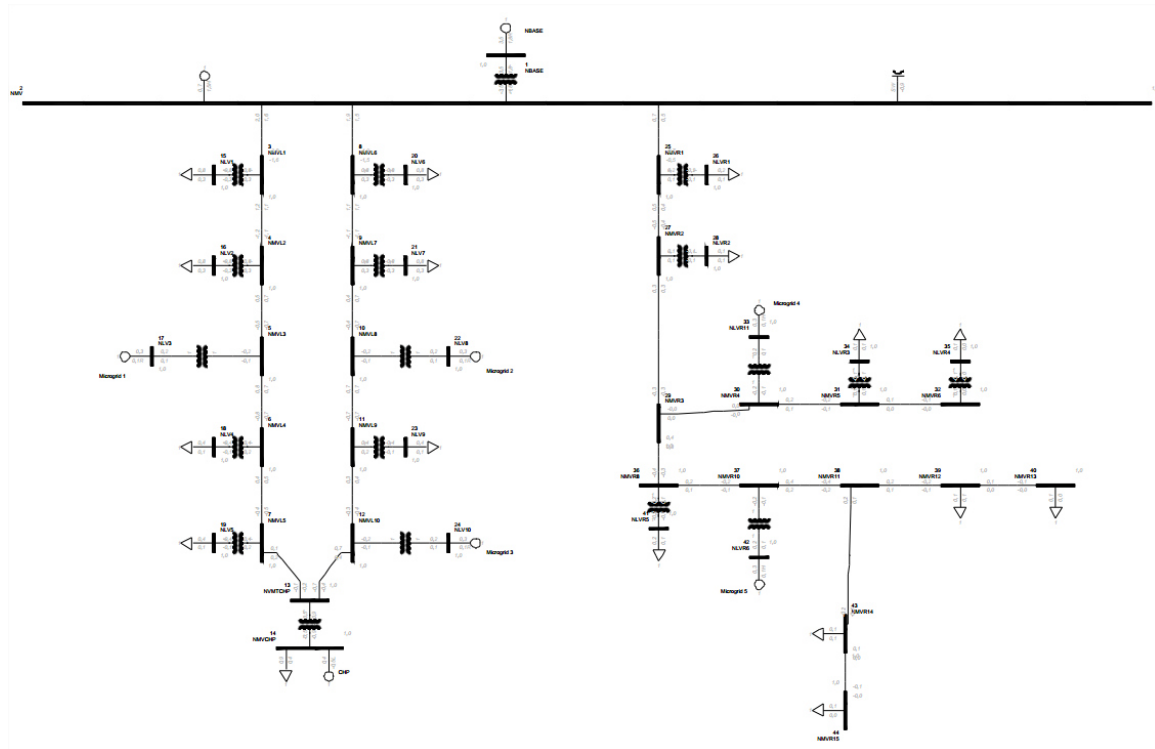


Figura 20 – Rede de testes final

Esta rede por sua vez apresenta apenas 44 barramentos interligados por 26 linhas e 19 transformadores. Foram também eliminados os pontos de geração dispersa (com exceção do grupo Diesel e CHP) visto não serem o foco principal desta tese. As microrredes surgem também representadas com apenas um gerador, visto que os dados obtidos desta rede apenas contemplavam a soma geral da produção de todas as tecnologias uma vez que não possuía uma base científica para a distribuição de uma percentagem pelas mesmas.

Os dados da rede de teste a utilizar da Figura 20 encontram-se disponíveis no anexo C.

Após esta breve caracterização da microrrede serão então demonstrados diversos cenários do estudo de trânsito de potências em regime estacionário que incluem:

- Cenário 1: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT sem as microrredes;
- Cenário 2: Rede de distribuição operada em malha fechada (disjuntor entre os nós 12 e 13 fechado) alimentada pela subestação AT/MT sem as microrredes;
- Cenário 3: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes;
- Cenário 4: Rede de distribuição operada em malha fechada (disjuntor entre os nós 12 e 13 fechado) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes;
- Cenário 5: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes e aumento da carga em 10%;
- Cenário 6: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes e aumento da carga em 20%;
- Cenário 7: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberta) em modo isolado (com as microrredes mas desconetada da subestação AT/MT).

Como referido anteriormente estes estudos foram realizados com recurso ao *software* PSS/E. De referir que o cálculo de trânsito de potências utilizado assenta no método de Gauss-Seidel.

5.1- Cenário 1: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT sem as microrredes

Neste primeiro cenário considera-se a rede adaptada a funcionar com a malha aberta, ou seja, sem a linha entre os barramentos 12 e 13 do diagrama. Para além disso, a alimentação da rede neste cenário será feita apenas através subestação AT/MT representada pelo nó NBASE. De referir ainda, que tendo este cenário alimentação pela subestação AT/MT será esse o barramento considerado como *swing*. O facto de este ser o barramento *swing* significa que é este o barramento responsável por assumir as variações nas cargas uma vez que a geração nos restantes barramentos é fixa, bem como, correspondendo ao barramento de referência das fases das tensões.

Assim sendo, procedeu-se à análise do trânsito de potências. No que diz respeito às tensões nos barramentos as mesmas são apresentadas no gráfico da Figura 21.

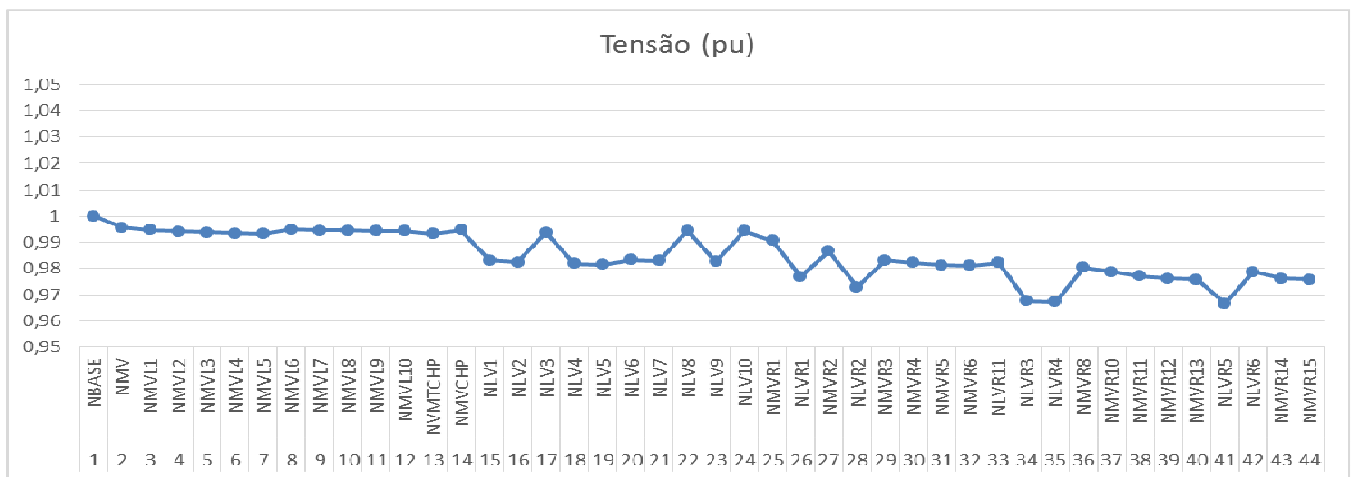


Figura 21 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 1

Pela observação do gráfico é possível verificar que as tensões nos nós da rede se encontram dentro dos limites estipulados, ainda que, as tensões nos nós 34, 35 e 41 se apresentem ligeiramente abaixo dos restantes. Como seria de esperar, verifica-se que os

nós com consumo possuem tensões mais baixas, enquanto, os nós sem cargas se encontram mais próximos do valor nominal de 1 pu.

No que toca às potências geradas, as mesmas apresentam-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Potências geradas relativas ao cenário 1

Número do Barramento	Nome do Barramento	PGen (MW)	PMax (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)
1	NBASE	6,201	7	0,9857	3,5	-3,5
2	NMV	0,7	0,7	1,5	1,5	-1,5
14	NMVCHP	0,4	0,4	0,5	0,5	-0,5
Total		7,301		2,9857		

Na Tabela 7 verifica-se que a rede é apenas alimentada pelos nós 1, 2 e 14 correspondentes à rede AT/MT (*swing*) e à produção dispersa (Diesel e Hidroelétrica) perfazendo uma potência total de 7,301 MW, sendo que 6,201 MW corresponde ao barramento *swing*.

Ao verificar os resultados obtidos, relativos à simulação de trânsito de potências, é possível o cálculo das perdas. Considerando a potência total das cargas de 6,739 MW e conhecendo também a potência total gerada obtém-se:

$$P_{perdas} = P_{Ger} - P_{Cargas} \Leftrightarrow$$

$$P_{perdas} = 7,301 \text{ MW} - 6,739 \text{ MW} \Leftrightarrow$$

$$P_{perdas} = 0,562 \text{ MW}$$

O que percentualmente se traduz em:

$$Perdas (\%) = \frac{P_{perdas}}{P_{Ger}} * 100 \Leftrightarrow$$

$$Perdas (\%) = \frac{0,562 \text{ MW}}{7,301 \text{ MW}} * 100 \Leftrightarrow$$

$$Perdas (\%) = 7,7\%$$

Constata-se que no que diz respeito a perdas nas linhas, apenas se registam perdas de 0,562 MW o que corresponde a 7,7% de perdas.

Os resultados obtidos no PSS/E estão disponíveis na Tabela 20 e na Figura 30 do Anexo D.

5.2 – Cenário 2: Rede de distribuição operada em malha fechada (disjuntor entre os nós 12 e 13 fechado) alimentada pela subestação AT/MT sem as microrredes

No segundo cenário considera-se a rede adaptada a funcionar em malha fechada, ou seja, com a linha entre os barramentos 12 e 13 do diagrama. Tal como no cenário anterior a alimentação da rede será assegurada pelos nós AT/MT e pelos nós de produção dispersa (Diesel e Hidroelétrica). Uma vez que parte da alimentação é assegurada pelo nó AT/MT será este o nó *swing*.

Tendo por base as considerações do parágrafo anterior foi resolvido o cálculo de trânsito de potências pelo método de Gauss-Seidel, através do qual foi possível obter o gráfico da Figura 22, que ilustra as tensões em cada barramento da rede de teste.

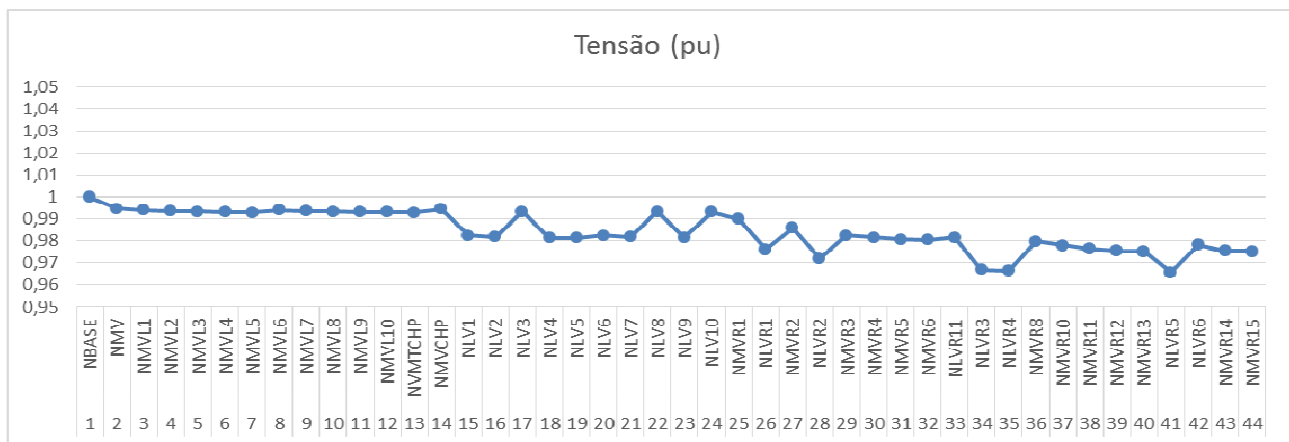


Figura 22 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 2

Uma primeira observação do gráfico da Figura 22 permite concluir desde logo que o perfil de tensões relativamente ao primeiro cenário é muito semelhante. Também é possível verificar que os limites impostos no que respeita à tensão dos barramentos são respeitados. Igualmente, conclui-se que mais uma vez os nós que apresentam tensões mais baixas

relativamente aos restantes são os nós 34, 35 e 41, o que desde já representa um padrão sendo que podem ser identificados como nós mais preocupantes no que diz respeito a outros cenários em termos dos limites impostos (entre os 0,95 pu e 1,05 pu).

No que diz respeito às potências geradas neste caso de teste as mesmas encontram-se sintetizadas na Tabela 8, apresentada seguidamente.

Tabela 8 – Potências geradas relativas ao cenário 2

Número do Barramento	Nome do Barramento	PGen (MW)	PMax (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)
1	NBASE	6,1097	7	1,1384	3,5	-3,5
2	NMV	0,7	0,7	1,5	1,5	-1,5
14	NMVCHP	0,4	0,4	0,5	0,5	-0,5
Total		7,2097		3,1384		

Observando a Tabela 8, pode-se concluir que comparativamente com o cenário anterior, em malha aberta, as potências fornecidas à rede pelo barramento *swing* (NBASE) baixaram. O que significa que a rede funcionando em malha aberta ou em malha fechada apresenta pontos de funcionamento diferentes. Assim, e por comparação, constata-se que neste cenário há uma ligeira melhoria na operação da rede. Com esta redução do fornecimento de energia no barramento AT/MT as restantes fontes continuam a debitar a mesma potência, como documenta a tabela anterior. A potência total gerada para alimentar a rede de teste baixou para o valor de 7,2097 MW, ou seja, significa uma redução de 0,0913 MW quando comparado com o cenário 1.

Tendo em conta a potência gerada e consumida, verificou-se o seguinte valor de perdas:

$$P_{perdas} = 7,2097 \text{ MW} - 6,739 \text{ MW} \Leftrightarrow$$

$$P_{perdas} = 0,4707 \text{ MW}$$

Em percentagem:

$$Perdas (\%) = \frac{0,4707 \text{ MW}}{7,301 \text{ MW}} * 100 \Leftrightarrow$$

$$Perdas (\%) = 6,53 \%$$

Estes resultados consistem numa redução da potência gerada de 0,0913 MW relativamente ao cenário 1.

Os resultados obtidos no PSS/E estão disponíveis na Tabela 21 e na Figura 31 do Anexo E.

5.3 – Cenário 3: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes

No terceiro cenário a rede de teste irá pela primeira vez contar com a contribuição das microrredes em conjunto com a subestação AT/MT e com as fontes de produção dispersa, considerando também, a configuração de malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto). Em termos práticos pode-se afirmar que é um acréscimo das microrredes ao cenário 1. Apesar da introdução das microrredes na rede de teste o barramento *swing* continuará a ser o da subestação AT/MT.

Tendo por base os pressupostos do parágrafo anterior procedeu-se ao cálculo do trânsito de potências pelo método de Gauss-Seidel. Os resultados da simulação permitiram construir o gráfico da Figura 23, que relaciona as tensões em cada um dos barramentos da rede de teste.

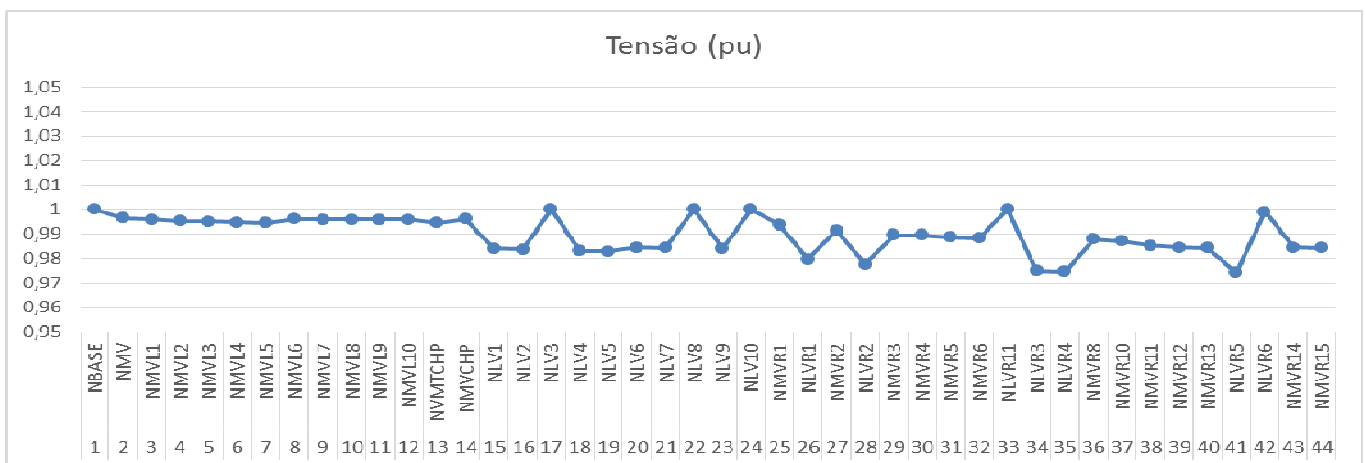


Figura 23 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 3

Numa primeira análise do gráfico da Figura 23 é desde logo possível observar que a introdução das microrredes na rede de teste provocou mudanças no perfil das tensões em cada barramento. Desde logo é de assinalar que os nós que sofreram a introdução das

microrredes de energia se aproximam do valor unitário de tensão de 1 pu. Para além desse facto, também se pode verificar que no geral as tensões em cada barramento subiram. Neste sentido pode-se concluir que a qualidade do fornecimento de energia à rede aumentou. Outro aspeto positivo associado com a introdução das microrredes consiste no afastamento do limiar crítico da tensão nos barramentos 34, 35 e 41 (nos cenários anteriores a tensão nestes nós era próxima do limite inferior de 0,95 pu).

Na Tabela 9 é possível verificar os impactos que a introdução das microrredes provocaram a nível de potências geradas.

Tabela 9 – Potências geradas relativas ao cenário 3

Número do Barramento	Nome do Barramento	PGen (MW)	PMax (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)
1	NBASE	4,6626	7	0,7488	3,5	-3,5
2	NMV	0,7	0,7	1,5	1,5	-1,5
14	NMVCHP	0,4	0,4	0,5	0,5	-0,5
17	NLV3	0,25	0,25	0,0441	0,1	-0,1
22	NLV8	0,25	0,25	0,0375	0,1	-0,1
24	NLV10	0,25	0,25	0,0372	0,1	-0,1
33	NLVR11	0,25	0,25	0,0874	0,1	-0,1
42	NLVR6	0,25	0,25	0,1	0,1	-0,1
Total		7,0126		3,055		

Na tabela pode-se observar uma redução da potência gerada pelo nó NBASE que funciona como *swing* quando comparada com o cenário 1, no qual o NBASE gerou 4,6626 MW, o que significa uma redução de 1,5384 MW. Não obstante, a potência total gerada reduziu cerca de 0,2884 MW o que significa uma redução das perdas na rede.

No que diz respeito a perdas nas linhas as mesmas são de:

$$P_{perdas} = 7,0126 \text{ MW} - 6,739 \text{ MW} \Leftrightarrow$$

$$P_{perdas} = 0,2736 \text{ MW}$$

O que percentualmente se traduz em:

$$Perdas (\%) = \frac{0,2736 \text{ MW}}{7,301 \text{ MW}} * 100 \Leftrightarrow$$

$$\text{Perdas (\%)} = 3,9 \%$$

Quando comparadas com o cenário 1 as perdas registam uma diminuição de 0,2884 MW.

Os resultados estão listados na Tabela 22 e na Figura 32 do Anexo F.

5.4 – Cenário 4: Rede de distribuição operada em malha fechada (disjuntor entre os nós 12 e 13 fechado) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes

Neste cenário avalia-se o comportamento do sistema com base na exploração da rede completa, ou seja, com a alimentação pela subestação AT/MT, pelas fontes de produção dispersa com o acréscimo das microrredes. Também aqui se considera a rede em circuito fechado fazendo a ligação entre os nós 12 e 13. Em comparação com cenários anteriores é possível afirmar que este cenário deriva do cenário 2 tendo agora em conta a introdução das microrredes. À semelhança dos casos anteriores em que o principal fornecedor da rede de teste é a subestação AT/MT, manter-se-á este barramento como *swing*.

Com os resultados desta simulação (obtidos com o PSS/E) gerou-se o gráfico da Figura 24, que ilustra o perfil da tensão na rede, e que também discrimina a tensão referente a cada nó neste cenário.

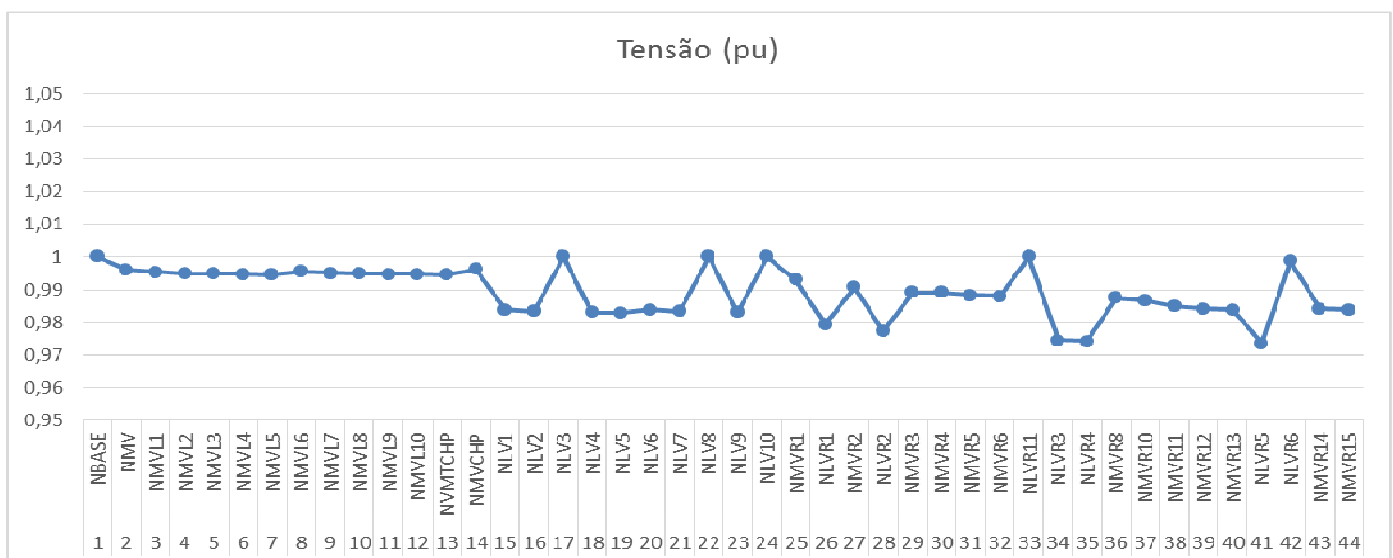


Figura 24 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 4

Pela observação do gráfico e quando comparado com o do cenário 2, são facilmente identificadas diferenças no perfil das tensões dos barramentos. Desde logo é possível observar que nos nós em que foram introduzidas as microrredes as tensões aproximaram-se do valor nominal (1 pu) isto significa um aumento da qualidade de serviço. Também nos restantes nós as tensões registaram um aumento. Destaque para os nós 34, 35 e 41 que, com este generalizado aumento de tensão, se afastaram do valor mínimo de 0,95 pu imposto como limite do qual estavam próximos no cenário 2.

Relativamente às potências geradas, na Tabela 10 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos neste cenário.

Tabela 10 – Potências geradas relativas ao cenário 4

Número do Barramento	Nome do Barramento	PGen (MW)	PMax (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)
1	NBASE	4,5642	7	0,8395	3,5	-3,5
2	NMV	0,7	0,7	1,5	1,5	-1,5
14	NMVCHP	0,4	0,4	0,5	0,5	-0,5
17	NLV3	0,25	0,25	0,0449	0,1	-0,1
22	NLV8	0,25	0,25	0,0443	0,1	-0,1
24	NLV10	0,25	0,25	0,0461	0,1	-0,1
33	NLVR11	0,25	0,25	0,0906	0,1	-0,1
42	NLVR6	0,25	0,25	0,1	0,1	-0,1
Total		6,9142		3,1654		

Observando da Tabela 10, e por comparação com o cenário 2, é possível afirmar que a produção no barramento *swing* (NBASE) baixou 0,8633 MW, o que significa uma menor dependência da rede a montante (*i.e.*, da infraestrutura convencional). Para além deste facto a potência total neste cenário (6,9142 MW) é inferior à potência gerada no cenário 2 em 0,2955 MW.

Podem-se então calcular as perdas nas linhas:

$$P_{perdas} = 6,9142 \text{ MW} - 6,739 \text{ MW} \Leftrightarrow$$

$$P_{perdas} = 0,1752 \text{ MW}$$

O que percentualmente se traduz em:

$$Perdas (\%) = \frac{0,1752 \text{ MW}}{7,301 \text{ MW}} * 100 \Leftrightarrow$$

$$Perdas (\%) = 2,53 \%$$

Perante estes resultados verifica-se que as perdas nas linhas quando comparadas com o cenário 2, registaram uma redução de os 0,2955 MW.

Os resultados completos estão na Tabela 23 e Figura 33 do Anexo G.

5.5 – Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes e aumento da carga em 10%

Neste cenário de teste a rede funcionará novamente em malha aberta (inexistência da linha entre os nós 12 e 13) e a alimentação da rede será suportada pela subestação AT/MT em conjunto com as fontes de produção dispersa e as microrredes introduzidas. Pode-se considerar que este cenário equivale ao cenário 3 com um aumento das cargas de 10% (consultar Tabela 16 do Anexo C). A definição de barramento *swing* manter-se-á, semelhança de outros cenários no barramento AT/MT.

Assumindo as diretrizes referidas no parágrafo anterior, procedeu-se ao cálculo de trânsito de potências, pelo método de Gauss-Seidel. Através dos resultados obtidos no *software* PSS/E tornou-se possível a elaboração do gráfico da Figura 25 que ilustra as tensões em cada um dos barramentos da rede de teste.

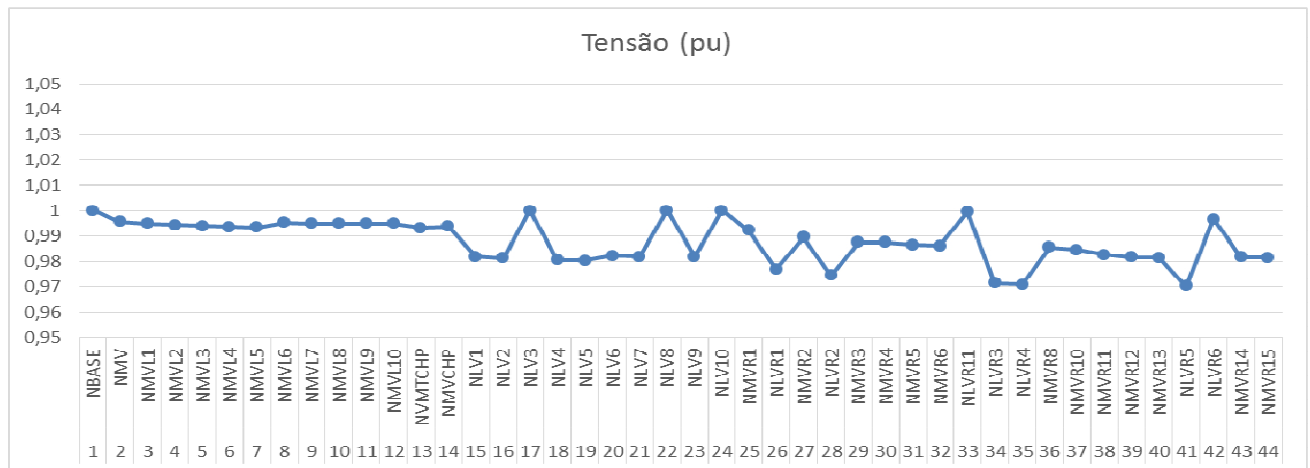


Figura 25 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 5

Pela observação do gráfico é possível desde logo concluir que o aumento das cargas originou uma diminuição geral da tensão em todos os nós, quando comparado com o cenário 3. Esta diminuição da tensão torna-se mais preocupante nos nós 34, 35 e 41, já identificados anteriormente como críticos uma vez que se aproximaram do limite inferior definido como 0,95 pu.

No que às potências diz respeito, é possível observar na Tabela 11 uma síntese dos resultados obtidos referentes às potências geradas.

Tabela 11 – Potências geradas relativas ao cenário 5

Número do Barramento	Nome do Barramento	PGen (MW)	PMax (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)
1	NBASE	5,4949	7	0,9556	3,5	-3,5
2	NMV	0,7	0,7	1,5	1,5	-1,5
14	NMVCHP	0,4	0,4	0,5	0,5	-0,5
17	NLV3	0,25	0,25	0,0533	0,1	-0,1
22	NLV8	0,25	0,25	0,0457	0,1	-0,1
24	NLV10	0,25	0,25	0,0455	0,1	-0,1
33	NLVR11	0,25	0,25	0,1	0,1	-0,1
42	NLVR6	0,25	0,25	0,1	0,1	-0,1
Total		7,8449		3,3001		

Analisando a Tabela 11, pode-se desde logo concluir que existiu um aumento da potência gerada no barramento *swing* neste cenário por comparação com o cenário 3, o que consequentemente fez aumentar a potência gerada total em 0,8323 MW. Este é um resultado já esperado perante o aumento das cargas.

Quanto a perdas as mesmas encontram-se calculadas de seguida:

$$P_{perdas} = 7,8449 \text{ MW} - 7,4129 \text{ MW} \leftrightarrow$$

$$P_{perdas} = 0,432 \text{ MW}$$

O que percentualmente se traduz em:

$$Perdas (\%) = \frac{0,432 \text{ MW}}{7,8449 \text{ MW}} * 100 \leftrightarrow$$

$$Perdas (\%) = 5,51 \%$$

Estes resultados significam um aumento das perdas quando comparadas com o cenário 3, em 0,1584 MW.

No Anexo H disponibilizam-se os resultados completos da simulação na Tabela 24 e na Figura 34.

5.6 – Cenário 6: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberto) alimentada pela subestação AT/MT com as microrredes e aumento da carga em 20%

Neste sexto cenário a rede irá ser submetida a novo aumento das cargas, desta vez em 20% do valor original definido (consultar Tabela 17 do anexo C). A alimentação será assegurada pela subestação AT/MT em conjunto com as fontes de produção dispersa (hidroelétrica e *diesel*) e as microrredes. A rede usada irá ser operada em circuito aberto, ou seja a linha entre os nós 12 e 13 estará fora de serviço. Para efeitos comparativos é seguro afirmar que este cenário se assemelha ao cenário 3 com o acréscimo de 20% do valor das cargas. Quanto ao barramento *swing* neste cenário e tal como nos anteriores está definido o barramento da subestação AT/MT.

Tendo em conta os aspetos mencionados no parágrafo anterior e com recurso mais uma vez ao *software* PSS/E procedeu-se à resolução do trânsito de potências pelo método de Gauss-

Seidel. Com os dados extraídos dos cálculos realizados pelo *software* foi possível construir o gráfico da Figura 26.

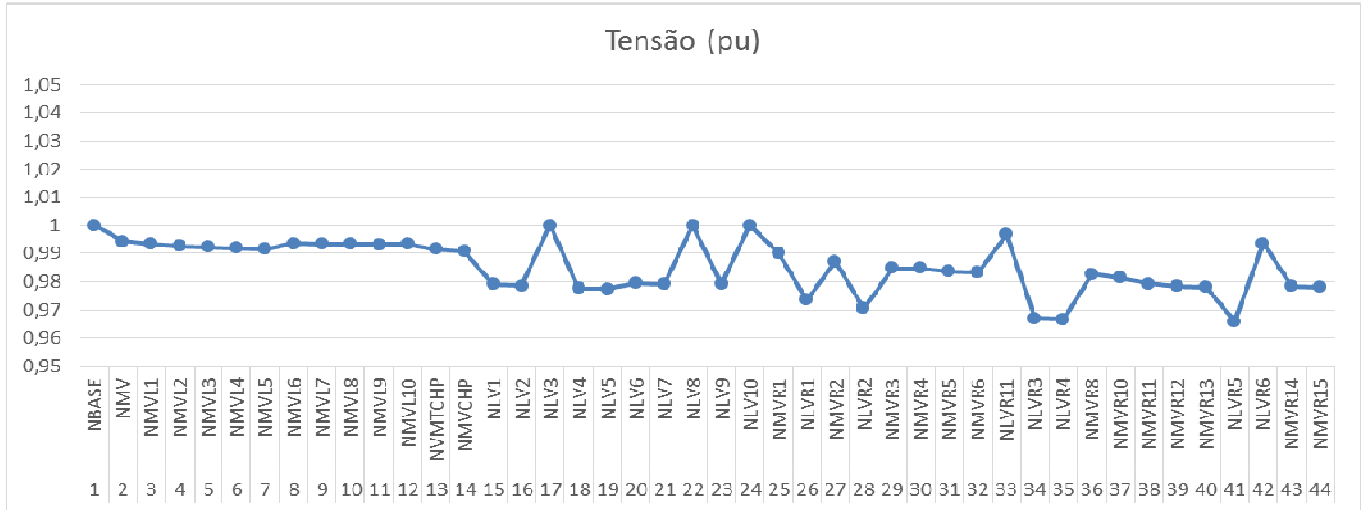


Figura 26 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 6

Pela observação do gráfico da Figura 26, o dado mais relevante é mais uma vez a redução das tensões nos barramentos quando comparadas com o cenário 3, sendo que esse é um resultado já esperado, visto o aumento bastante significativo das cargas. Destaque para os barramentos 34, 35 e 41 que se aproximam bastante dos valores mínimos exigidos para a tensão nos barramentos de 0,95 pu.

No que diz respeito às potências geradas, apresenta-se seguidamente a Tabela 12, o que resume as potências geradas.

Tabela 12 – Potências geradas relativas ao cenário 6

Número do Barramento	Nome do Barramento	PGen (MW)	PMax (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)
1	NBASE	6,2725	7	1,2363	3,5	-3,5
2	NMV	0,7	0,7	1,5	1,5	-1,5
14	NMVCHP	0,4	0,4	0,5	0,5	-0,5
17	NLV3	0,25	0,25	0,0653	0,1	-0,1
22	NLV8	0,25	0,25	0,0568	0,1	-0,1
24	NLV10	0,25	0,25	0,0566	0,1	-0,1
33	NLVR11	0,25	0,25	0,1	0,1	-0,1
42	NLVR6	0,25	0,25	0,1	0,1	-0,1
Total		8,6225		3,615		

Pela análise da Tabela 12, pode-se verificar o aumento da potência gerada no barramento *swing* como consequência direta do aumento das cargas, este aumento foi de 1,609 MW. A potência total gerada é de 8,6225 MW.

No que toca a perdas neste cenário as mesmas podem ser calculadas:

$$P_{perdas} = 8,6225 \text{ MW} - 8,0868 \text{ MW} \leftrightarrow$$

$$P_{perdas} = 0,5357 \text{ MW}$$

Percentualmente:

$$Perdas (\%) = \frac{0,5357 \text{ MW}}{8,6225 \text{ MW}} * 100 \leftrightarrow$$

$$Perdas (\%) = 6,21 \%$$

O que se traduz num aumento das perdas de 0,2621 MW quando comparadas com o cenário 3.

No Anexo I disponibilizam-se os resultados completos da simulação através da Tabela 25 e da Figura 35.

5.7 – Cenário 7: Rede de distribuição operada em malha aberta (disjuntor entre os nós 12 e 13 aberta) em modo isolado (com as microrredes mas desconetada da subestação AT/MT)

Neste último cenário irá ser testado o funcionamento da rede em modo isolado ou seja, a rede será alimentada exclusivamente pelas microrredes e PD existente uma vez que se encontra desconetada a subestação AT/MT. Esta simulação irá permitir verificar se as microrredes em conjunto com a produção dispersa existente tem capacidade para suportar as cargas sem comprometer a qualidade do serviço, ou seja, manter as tensões dos barramentos dentro dos valores estipulados (0,95 a 1,05 pu). Esta simulação será feita em malha aberta uma vez que foi verificado que é nesta configuração que é necessário um maior fornecimento de energia, atendendo ao valor mais elevado das perdas na rede. Para além disso como barramento *swing* irá ser considerado o barramento de PD (NMV). Pode ser tomado como caso de comparação o cenário 3, não desconsiderando o facto de que agora a rede está a operar em modo isolado (*i.e.*, sem a alimentação da subestação AT/MT).

Após as considerações acima referidas, e tendo por auxílio uma vez mais o PSS/E procedeu-se à simulação. No gráfico da Figura 27 apresenta-se a distribuição das tensões pelos barramentos da rede de teste.

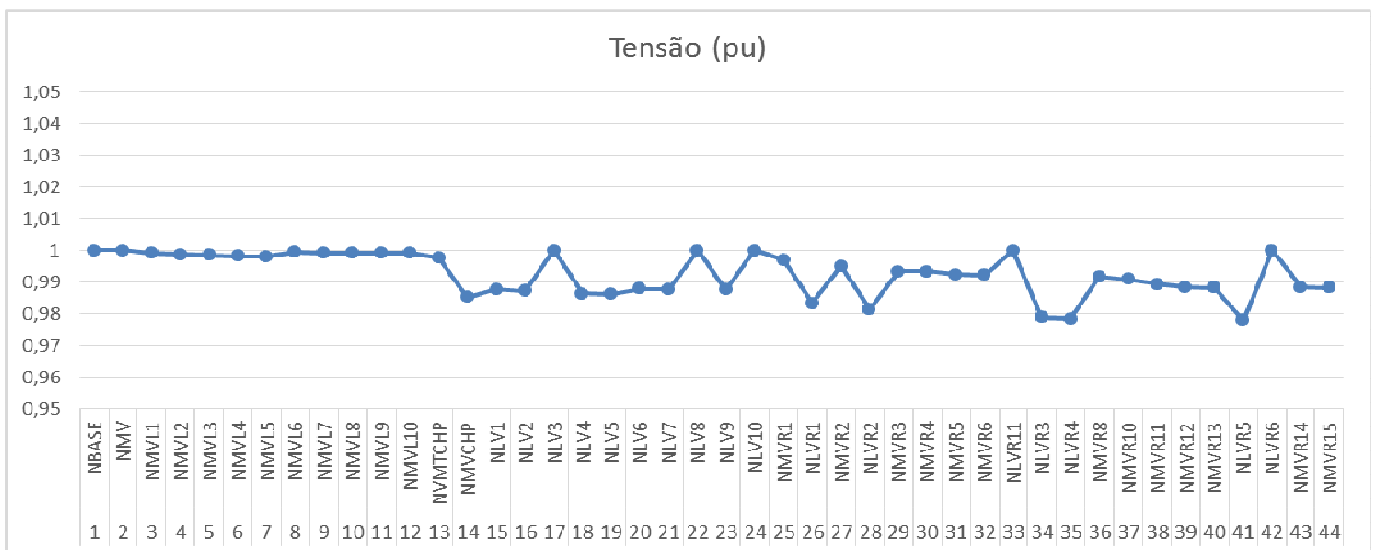


Figura 27 – Perfil do módulo da tensão nos barramentos da rede no cenário 7

Pela observação do gráfico da Figura 27 é possível aferir diferenças no que toca ao perfil das tensões quando comparado como os restantes cenários em particular com o cenário 3. Pode-se verificar também que, apesar da falta de alimentação por parte da subestação AT/MT, as tensões nos barramentos aumentaram.

Na Tabela 13 disponibilizam-se os valores das potências geradas em cada barramento.

Tabela 13 – Potências geradas relativas ao cenário 7

Número do Barramento	Nome do Barramento	PGen (MW)	PMax (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)
1	NBASE	0	7	0	3,5	-3,5
2	NMV	5,0907	0,7	1,323	1,5	-1,5
14	NMVCHP	0,4	0,4	0,364	0,5	-0,5
17	NLV3	0,25	0,25	0,0158	0,1	-0,1
22	NLV8	0,25	te.	0,0093	0,1	-0,1
24	NLV10	0,25	0,25	0,0093	0,1	-0,1
33	NLVR11	0,25	0,25	0,057	0,1	-0,1
42	NLVR6	0,25	0,25	0,0759	0,1	-0,1
Total		6,7407		1,8543		

Na Tabela 13 é possível confirmar que não houve geração por parte do barramento da subestação AT/MT. Para além disso também se pode verificar que o barramento *swing* (NMV) excedeu em 4,3321 MW a sua capacidade de geração de modo a suportar as cargas existentes na rede. De modo a fazer face este défice de capacidade da geração no modo isolado deveriam ser introduzidas algumas alterações por forma a evitar deslastre de cargas. Uma alteração consistiria em aumentar/reforçar a potência instalada nas microrredes de modo a igualar os consumos. Outra alteração possível, consiste em incorporar mais microrredes. Estas alterações implicariam um investimento importante nas microrredes.

Resultados disponíveis na Tabela 26 e Figura 36 do anexo J.

6 – Conclusão

Nos últimos anos assistiu-se a um crescimento da produção distribuída de eletricidade devido aos mecanismos de incentivo que foram implementados principalmente nos países que integram a União Europeia. Perante este cenário tem-se verificado um aumento da ligação de pequenas unidades de produção distribuída (microgeração) à rede de baixa tensão. Este facto tem levado à investigação sobre formas de integrar os sistemas de microgeração nas redes de baixa tensão. Neste âmbito, um dos conceitos que têm vindo a ser desenvolvido são as microrredes eléctricas. Foi neste contexto que se desenvolveu este trabalho.

Numa primeira parte foi feito um estudo do estado da arte, em que de uma maneira geral se teve em conta a perspectiva da regulamentação no que diz respeito às microrredes. Foi possível verificar que há já alguns anos esta temática foi abordada a nível de legislação nos EUA, através da IEEE. No âmbito da União Europeia também já existem algumas diretivas, no entanto, cada país tem a sua legislação própria pelo que não existe nenhuma norma generalizada.

Outro dos temas abordados nesta tese, foi a questão técnica a nível da arquitetura das microrredes onde se pode observar que já existem alguns métodos de controlo desenvolvidos nomeadamente o *Single Master Operation* (SMO) e *Multi Master Operation* (MMO).

Ainda no capítulo sobre o estado da arte, foram abordadas as diversas tecnologias de geração e armazenamento de energia passíveis de serem implementadas numa microrrede.

Este trabalho teve uma importante componente de testes em ambiente virtual, onde foram exploradas algumas das potencialidades do *software* PSS/E da Siemens. Esta ferramenta foi fundamental para a realização das simulações práticas apresentadas nesta tese em que se consideraram diferentes cenários de operação da rede em estudo. De entre as inúmeras funcionalidades que este *software* possui apenas se recorreu à análise em regime estacionário e à ferramenta de trânsitos de potência.

A aplicação prática realizada neste trabalho teve em conta de modo a verificar a influência das microrredes numa rede comum com diversas cargas. Foi possível verificar a influência positiva das microrredes, nomeadamente ao nível do aumento da tensão dos barramentos para valores mais próximos do nominal, bem como uma capacidade de suporte de energia reativa à rede e das perdas, o que certamente origina uma redução global de perdas no SEE. Outro aspeto de realce é o facto de as MR permitirem uma autonomia parcial, ou até mesmo total, na alimentação das cargas elétricas existentes na sua área de influência.

Conclui-se assim que as microrredes têm em geral um efeito positivo na rede ainda que seja necessário alguma precaução no que diz respeito a alguns aspetos técnicos, tais como impactos dinâmicos de operação (frequência, harmónicas...), mas também económicos. Como tal é essencial avaliar muito bem, caso a caso, todos os prós e contras da integração de MR nos SEE. Outro dos pontos que necessita de desenvolvimentos importantes é o da legislação e normalização onde ainda existe um longo caminho a percorrer no que se refere à integração das microrredes.

Finalmente, e como sugestão de desenvolvimento desta temática, os trabalhos futuros sobre MR devem ter em conta a aplicação deste conceito também em ambiente industrial. Aqui é também essencial a definição de uma arquitetura da microrrede no sentido de obter uma melhoria mensurável dos níveis de eficiência energética (*Zero Energy Net*). A investigação a realizar no âmbito do projeto INDuGRID permitirá, seguramente, atingir um patamar de conhecimento bastante importante sobre este assunto.

Referências bibliográficas

- [1] Hatziargyriou, N. (2013). *Microgrids: Architectures and Control*. Greece: National Technical University of Athens.
- [2] Sanz, J. et al., 2014. *Analysis of European policies and incentives for microgrids*. Cordoba, Renewable Energy and Power Quality Journal.
- [3] Basso, T. (2014). *IEEE 1547 and 2030 Standards for Distributed Energy Resources Interconnection and Interoperability with the Electricity Grid*. Golden: National Renewable Energy Laboratory.
- [4] Vieira, G. J. (2012). *Desequilíbrios de tensão em microrredes durante o funcionamento em modo isolado*. Porto: FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.
- [5] Taiyo Portal. (s.d.). Obtido em 15 de janeiro de 2016, de http://taiyo-portal.jp/glossary/ta_columns/ssilicon.php
- [6] Almeida, C. (2015 de dezembro de 2015). *APREN*. Obtido em 15 de janeiro de 2016, de http://www.apren.pt/fotos/editor2/carlos_almeida.pdf
- [7] Meio Ambiente - Cultura Mix. (s.d.). Obtido em 15 de janeiro de 2016, de <http://meioambiente.culturamix.com/noticias/beneficios-da-energia-eolica-para-a-humanidade>
- [8] Blog dos Desenvolvimentistas. (s.d.). Obtido em 15 de janeiro de 2016, de <http://www.desenvolvimentistas.com.br/blog/blog/2013/02/06/novas-tecnologias-levam-turbinas-eolicas-para-o-alto-mar/>
- [9] Formiga, A. d. (2012). *Produção de energia a partir de resíduos sólidos*. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande.
- [10] Alcateia de Raciocínios. (2013). Obtido em 15 de janeiro de 2016, de <http://alcateiaderaciocinios.blogspot.pt/2013/09/celula-combustivel.html>

- [11] Heim, B. (2013). *Diario Electronico Hoy*. Obtido em 15 de janeiro de 2016, de <http://www.diarioelectronicohey.com/los-supercondensadores-y-sus-beneficios-de-diseno-en-aplicaciones-esenciales/>
- [12] Carvalho, A. M., Marques, B. F., & Apura, P. F. (s.d.). *Instituto Politécnico de Viseu*. Obtido em 15 de janeiro de 2016, de http://www.ipv.pt/millennium/arq8_fly.htm
- [13] SIEMENS. (s.d.). Obtido em 15 de janeiro de 2016, de <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/software-solutions/planning-data-management-software/planning-simulation/Pages/PSS-E.aspx>
- [14] Lopes, J., Madureira, A., Bessa, R., Gomes, M., Saraiva, J., Pudjanto, D., et al. (2009). *Definition of Ancillary Services and Short-Term Energy Markets*. Porto.
- [15] Preto, V. M. (2012). *Redes de Distribuição Ativas*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto .
- [16] 2.^a Jornadas RIGMEI - Atas. (2014). Tomar: Instituto Politécnico de Tomar.

Anexos

Anexo A – Esquema Elétrico da Rede Original

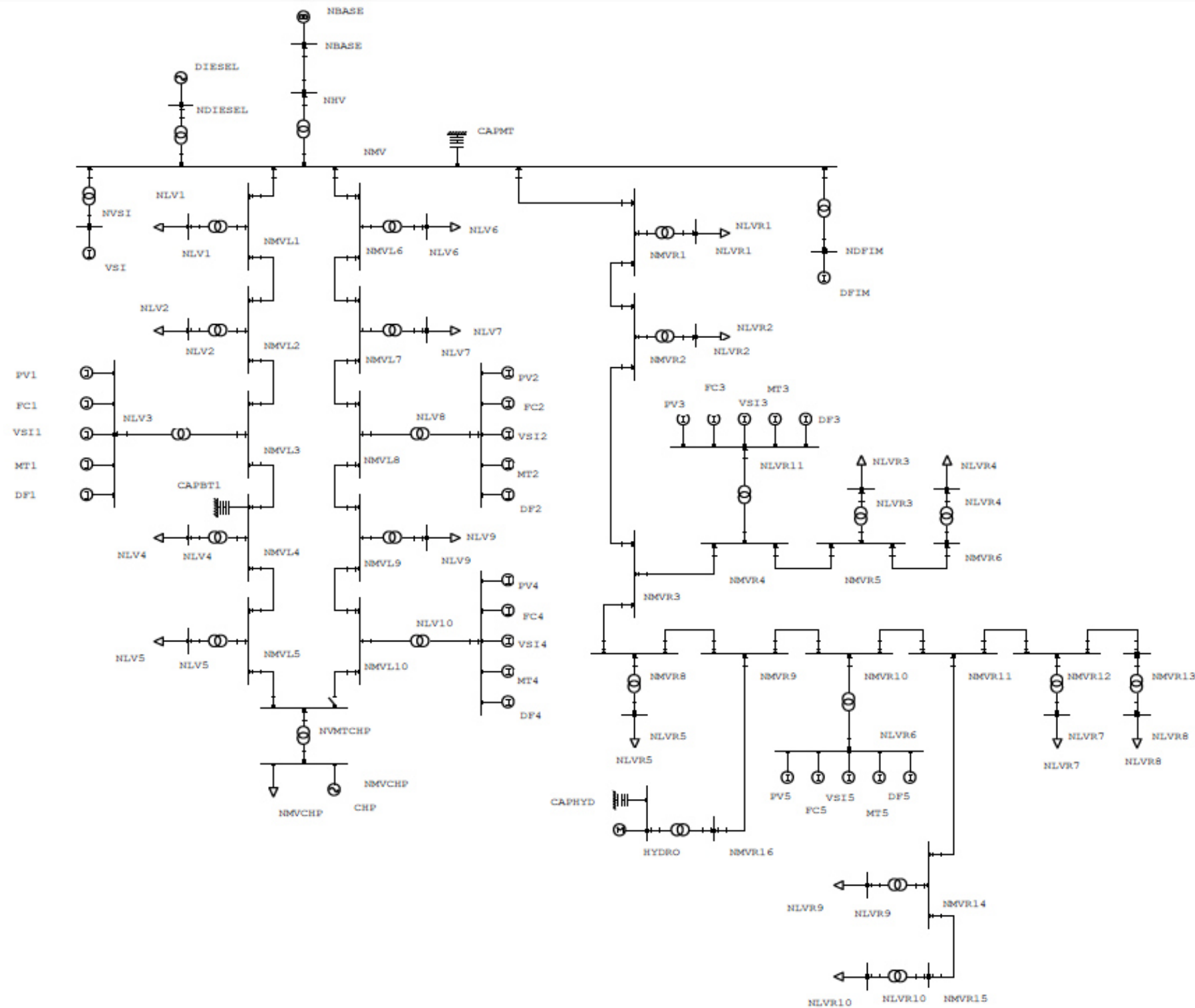


Figura 28 – Pormenor da rede original

Anexo B –Esquemático da Rede de Teste

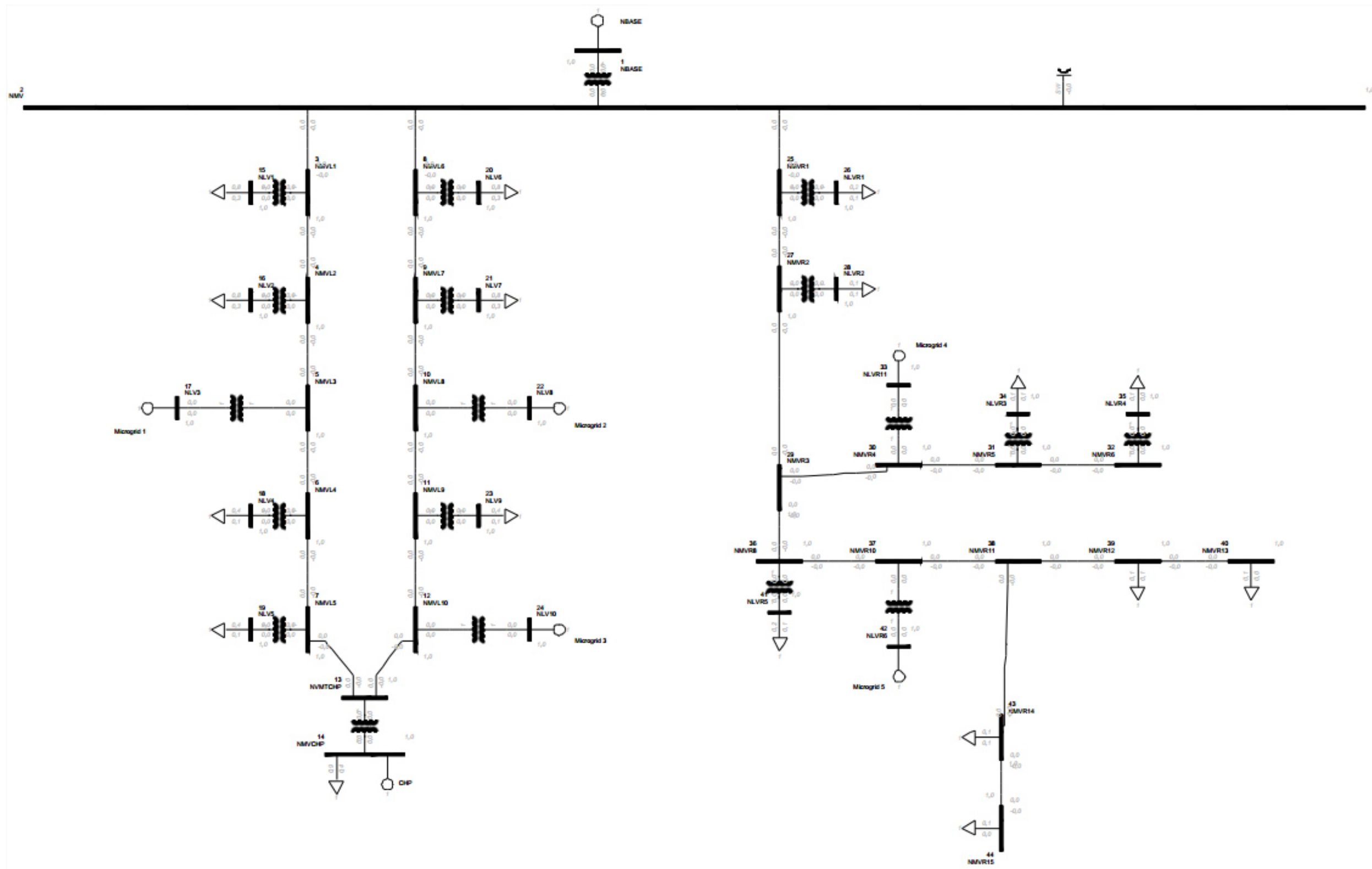


Figura 29 – Pormenor da rede de teste

Anexo C – Dados relativos à Rede de Teste

Tabela 14 – Dados relativos aos geradores da rede de teste

Número do Barramento	Nome do Barramento	PMax (MW)	PMin (MW)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)	Mbase (MVA)
1	NBASE	7	0	3,5	-3,5	100
2	NMV	0,7	0	1,5	-1,5	100
14	NMVCHP	0,4	0	0,5	-0,5	100
17	NLV3	0,25	0	0,1	-0,1	100
22	NLV8	0,25	0	0,1	-0,1	100
24	NLV10	0,25	0	0,1	-0,1	100
33	NLVR11	0,25	0	0,1	-0,1	100
42	NLVR6	0,25	0	0,1	-0,1	100

Tabela 15 – Dados base relativos às cargas da rede de teste

Número do Barramento	Nome do Barramento	PCarga (MW)	QCarga (Mvar)
14	NMVCHP	0,9	0,436
15	NLV1	0,838	0,275
16	NLV2	0,838	0,275
18	NLV4	0,419	0,138
19	NLV5	0,419	0,138
20	NLV6	0,838	0,275
21	NLV7	0,838	0,275
23	NLV9	0,419	0,138
26	NLVR1	0,216	0,105
28	NLVR2	0,135	0,065
34	NLVR3	0,135	0,065
35	NLVR4	0,086	0,042
39	NMVR12	0,135	0,065
40	NMVR13	0,086	0,042
41	NLVR5	0,216	0,105
43	NMVR14	0,135	0,065
44	NMVR15	0,086	0,042
	Total	6,739	2,546

Tabela 16 – Dados base relativos às cargas com acréscimo de 10%

Número do Barramento	Nome do Barramento	PCarga (MW)	QCarga (Mvar)
14	NMVCHP	0,99	0,4796
15	NLV1	0,9218	0,3025
16	NLV2	0,9218	0,3025
18	NLV4	0,4609	0,1518
19	NLV5	0,4609	0,1518
20	NLV6	0,9218	0,3025
21	NLV7	0,9218	0,3025
23	NLV9	0,4609	0,1518
26	NLVR1	0,2376	0,1155
28	NLVR2	0,1485	0,0715
34	NLVR3	0,1485	0,0715
35	NLVR4	0,0946	0,0462
39	NMVR12	0,1485	0,0715
40	NMVR13	0,0946	0,0462
41	NLVR5	0,2376	0,1155
43	NMVR14	0,1485	0,0715
44	NMVR15	0,0946	0,0462
	Total	7,4129	2,8006

Tabela 17 – Dados base relativos às cargas com acréscimo de 20%

Número do Barramento	Nome do Barramento	PCarga (MW)	QCarga (Mvar)
14	NMVCHP	1,08	0,5232
15	NLV1	1,0056	0,33
16	NLV2	1,0056	0,33
18	NLV4	0,5028	0,1656
19	NLV5	0,5028	0,1656
20	NLV6	1,0056	0,33
21	NLV7	1,0056	0,33
23	NLV9	0,5028	0,1656
26	NLVR1	0,2592	0,126
28	NLVR2	0,162	0,078
34	NLVR3	0,162	0,078
35	NLVR4	0,1032	0,0504
39	NMVR12	0,162	0,078
40	NMVR13	0,1032	0,0504
41	NLVR5	0,2592	0,126
43	NMVR14	0,162	0,078
44	NMVR15	0,1032	0,0504
	Total	8,0868	3,0552

Tabela 18 – Dados referentes às linhas da rede de teste

Do Barramento Número	Do Barramento Nome	Para o Barramento Número	Para o Barramento Nome	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Limite (MVA)
2	NMV	3	NMVL1	0,0204	0,01508	0,000028	3,5
2	NMV	8	NMVL6	0,0204	0,01508	0,000028	3,5
2	NMV	25	NMVR1	0,29236	0,1576	0,000003	2
3	NMVL1	4	NMVL2	0,0204	0,01508	0,000028	3
4	NMVL2	5	NMVL3	0,0204	0,01508	0,000028	2
5	NMVL3	6	NMVL4	0,0204	0,01508	0,000028	2
6	NMVL4	7	NMVL5	0,0204	0,01508	0,000028	2
7	NMVL5	13	NVMTCHP	0,0204	0,01508	0,000028	2
8	NMVL6	9	NMVL7	0,0204	0,01508	0,000008	3
9	NMVL7	10	NMVL8	0,0204	0,01508	0,000008	2
10	NMVL8	11	NMVL9	0,0204	0,01508	0,000008	2
11	NMVL9	12	NMVL10	0,0204	0,01508	0,000028	2
12	NMVL10	13	NVMTCHP	0,02	0,01508	0,000028	2
25	NMVR1	27	NMVR2	0,29236	0,1576	0,000003	2
27	NMVR2	29	NMVR3	0,29236	0,1576	0,000003	2
29	NMVR3	30	NMVR4	0,29236	0,1576	0,000003	2
29	NMVR3	36	NMVR8	0,29236	0,1576	0,000003	2
30	NMVR4	31	NMVR5	0,29236	0,1576	0,000003	2
31	NMVR5	32	NMVR6	0,29236	0,1576	0,000003	2
36	NMVR8	37	NMVR10	0,29236	0,1576	0,000003	2
37	NMVR10	38	NMVR11	0,29236	0,1576	0,000003	2
38	NMVR11	39	NMVR12	0,29236	0,1576	0,000003	2
38	NMVR11	43	NMVR14	0,29236	0,1576	0,000003	2
39	NMVR12	40	NMVR13	0,29236	0,1576	0,000003	2
43	NMVR14	44	NMVR15	0,29236	0,1576	0,000003	2

Tabela 19 – Dados referentes aos transformadores da rede de teste

Do Barramento Número	Do Barramento Nome	Para o Barramento Número	Para o Barramento Nome	X (pu)	Limite (MVA)
1	NBASE	2	NMV	0,5	7
3	NMVL1	15	NLV1	3,968254	1,3
4	NMVL2	16	NLV2	3,968254	1,3
5	NMVL3	17	NLV3	12,5	0,4
6	NMVL4	18	NLV4	7,936508	0,6
7	NMVL5	19	NLV5	7,936508	0,6
8	NMVL6	20	NLV6	3,968254	1,3
9	NMVL7	21	NLV7	3,968254	1,3
10	NMVL8	22	NLV8	12,5	0,4
11	NMVL9	23	NLV9	7,936508	0,6
12	NMVL10	24	NLV10	12,5	0,4
13	NVMTCHP	14	NMVCHP	2,5	0
25	NMVR1	26	NLVR1	12,5	0,4
27	NMVR2	28	NLVR2	20	0,3
30	NMVR4	33	NLVR11	12,5	0,4
31	NMVR5	34	NLVR3	20	0,3
32	NMVR6	35	NLVR4	31,25	0,2
36	NMVR8	41	NLVR5	12,5	0,4
37	NMVR10	42	NLVR6	12,5	0,4

Anexo D – Resultados relativos à simulação do cenário 1

Tabela 20 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 1

Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
2	NMV	0,9956	-1,78	24	NLV10	0,9944	-1,8
3	NMVL1	0,9947	-1,8	25	NMVR1	0,9907	-1,78
4	NMVL2	0,9942	-1,81	26	NLVR1	0,9769	-3,38
5	NMVL3	0,9938	-1,82	27	NMVR2	0,9866	-1,78
6	NMVL4	0,9935	-1,83	28	NLVR2	0,9729	-3,4
7	NMVL5	0,9933	-1,83	29	NMVR3	0,9831	-1,78
8	NMVL6	0,995	-1,79	30	NMVR4	0,9823	-1,78
9	NMVL7	0,9946	-1,8	31	NMVR5	0,9814	-1,79
10	NMVL8	0,9945	-1,8	32	NMVR6	0,9811	-1,79
11	NMVL9	0,9944	-1,8	33	NLVR11	0,9823	-1,79
12	NMVL10	0,9944	-1,8	34	NLVR3	0,9676	-3,42
13	NVMTCHP	0,9932	-1,84	35	NLVR4	0,9672	-3,41
14	NMVCHP	0,9948	-2,57	36	NMVR8	0,9805	-1,79
15	NLV1	0,9831	-3,75	37	NMVR10	0,9788	-1,79
16	NLV2	0,9825	-3,76	38	NMVR11	0,9771	-1,79
17	NLV3	0,9938	-1,82	39	NMVR12	0,9762	-1,79
18	NLV4	0,9818	-3,78	40	NMVR13	0,9759	-1,79
19	NLV5	0,9816	-3,79	41	NLVR5	0,9666	-3,42
20	NLV6	0,9833	-3,74	42	NLVR6	0,9788	-1,79
21	NLV7	0,983	-3,75	43	NMVR14	0,9762	-1,79
22	NLV8	0,9945	-1,8	44	NMVR15	0,9759	-1,79

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E									
FRI, NOV 04 2016 21:38									
MESTRADO									
TESE									
***** SUMMARY FOR COMPLETE SYSTEM *****									
SYSTEM SWING BUS SUMMARY									
X-----	SWING BUS	-----X	X-----	AREA	-----X	X-----	ZONE	-----X	
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	# X--	NAME	--X	# X--	NAME	--X	
1	NBASE		1			1			
44 BUSES		3 PLANTS		3 MACHINES		0 INDUCTION GENS		0 INDUCTION MOTORS	
17 LOADS		0 FIXED SHUNTS		1 SWITCHED SHUNTS					
43 BRANCHES		19 TRANSFORMERS		0 DC LINES		0 FACTS DEVICES		0 GNE DEVICES	
X----- ACTUAL -----X X----- NOMINAL -----X									
		MW		MVAR		MW		MVAR	
FROM GENERATION		7.3		3.0		7.3		3.0	
FROM INDUCTION GENERATORS		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO CONSTANT POWER LOAD		6.7		2.5		6.7		2.5	
TO CONSTANT CURRENT		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO CONSTANT ADMITTANCE		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO INDUCTION MOTORS		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO BUS SHUNT		0.0		-0.9		0.0		-0.9	
TO FACTS DEVICE SHUNT		0.0		0.0		0.0		0.0	

Figura 30 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 1

Anexo E – Resultados relativos à simulação do cenário 2

Tabela 21 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 2

Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
1	NBASE	1	0	23	NLV9	0,9815	-3,74
2	NMV	0,9948	-1,76	24	NLV10	0,9931	-1,79
3	NMVL1	0,9941	-1,77	25	NMVR1	0,9899	-1,76
4	NMVL2	0,9936	-1,78	26	NLVR1	0,9761	-3,36
5	NMVL3	0,9933	-1,78	27	NMVR2	0,9859	-1,76
6	NMVL4	0,9931	-1,79	28	NLVR2	0,9721	-3,37
7	NMVL5	0,993	-1,79	29	NMVR3	0,9824	-1,75
8	NMVL6	0,9941	-1,77	30	NMVR4	0,9815	-1,76
9	NMVL7	0,9936	-1,78	31	NMVR5	0,9807	-1,76
10	NMVL8	0,9934	-1,78	32	NMVR6	0,9804	-1,76
11	NMVL9	0,9932	-1,79	33	NLVR11	0,9815	-1,76
12	NMVL10	0,9931	-1,79	34	NLVR3	0,9669	-3,39
13	NVMTCHP	0,993	-1,79	35	NLVR4	0,9664	-3,38
14	NMVCHP	0,9946	-2,52	36	NMVR8	0,9798	-1,76
15	NLV1	0,9824	-3,72	37	NMVR10	0,978	-1,76
16	NLV2	0,9819	-3,73	38	NMVR11	0,9763	-1,76
17	NLV3	0,9933	-1,78	39	NMVR12	0,9755	-1,76
18	NLV4	0,9814	-3,74	40	NMVR13	0,9752	-1,76
19	NLV5	0,9813	-3,75	41	NLVR5	0,9658	-3,39
20	NLV6	0,9824	-3,72	42	NLVR6	0,9781	-1,76
21	NLV7	0,9819	-3,73	43	NMVR14	0,9755	-1,76
22	NLV8	0,9934	-1,78	44	NMVR15	0,9752	-1,76

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E									
FRI, NOV 04 2016 21:41									
MESTRADO									
TESE									
***** SUMMARY FOR COMPLETE SYSTEM *****									
SYSTEM SWING BUS SUMMARY									
X-----	SWING BUS	-----X	X-----	AREA	-----X	X-----	ZONE	-----X	
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	# X--	NAME	--X	# X--	NAME	--X	
1	NBASE		1			1			
44 BUSES		3 PLANTS		3 MACHINES		0 INDUCTION GENS		0 INDUCTION MOTORS	
17 LOADS		0 FIXED SHUNTS		1 SWITCHED SHUNTS					
44 BRANCHES		19 TRANSFORMERS		0 DC LINES		0 FACTS DEVICES		0 GNE DEVICES	
X----- ACTUAL -----X X----- NOMINAL -----X									
		MW		MVAR		MW		MVAR	
FROM GENERATION		7.2		3.1		7.2		3.1	
FROM INDUCTION GENERATORS		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO CONSTANT POWER LOAD		6.7		2.5		6.7		2.5	
TO CONSTANT CURRENT		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO CONSTANT ADMITTANCE		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO INDUCTION MOTORS		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO BUS SHUNT		0.0		-0.9		0.0		-0.9	
TO FACTS DEVICE SHUNT		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO GNE BUS DEVICES		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO LINE SHUNT		0.0		0.0		0.0		0.0	

Figura 31 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 2

Anexo F – Resultados relativos à simulação do cenário 3

Tabela 22 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 3

Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
1	NBASE	1	0	23	NLV9	0,9841	-3,29
2	NMV	0,9965	-1,34	24	NLV10	1	0,45
3	NMVL1	0,9958	-1,35	25	NMVR1	0,9935	-1,32
4	NMVL2	0,9953	-1,36	26	NLVR1	0,9797	-2,91
5	NMVL3	0,995	-1,37	27	NMVR2	0,9913	-1,3
6	NMVL4	0,9947	-1,37	28	NLVR2	0,9776	-2,9
7	NMVL5	0,9945	-1,38	29	NMVR3	0,9896	-1,28
8	NMVL6	0,9961	-1,34	30	NMVR4	0,9896	-1,27
9	NMVL7	0,9958	-1,34	31	NMVR5	0,9887	-1,27
10	NMVL8	0,9958	-1,34	32	NMVR6	0,9884	-1,27
11	NMVL9	0,9958	-1,34	33	NLVR11	1	0,54
12	NMVL10	0,9958	-1,34	34	NLVR3	0,975	-2,88
13	NVMTCHP	0,9944	-1,39	35	NLVR4	0,9746	-2,87
14	NMVCHP	0,996	-2,11	36	NMVR8	0,9879	-1,27
15	NLV1	0,9841	-3,3	37	NMVR10	0,9871	-1,27
16	NLV2	0,9836	-3,31	38	NMVR11	0,9854	-1,27
17	NLV3	1	0,43	39	NMVR12	0,9845	-1,27
18	NLV4	0,983	-3,32	40	NMVR13	0,9843	-1,27
19	NLV5	0,9828	-3,33	41	NLVR5	0,9741	-2,88
20	NLV6	0,9844	-3,29	42	NLVR6	0,9991	0,55
21	NLV7	0,9842	-3,29	43	NMVR14	0,9845	-1,27
22	NLV8	1	0,45	44	NMVR15	0,9843	-1,27

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E									
FRI, NOV 04 2016 21:43									
MESTRADO									
TESE									
***** SUMMARY FOR COMPLETE SYSTEM *****									
SYSTEM SWING BUS SUMMARY									
X-----	SWING BUS	-----X	X-----	AREA	-----X	X-----	ZONE	-----X	
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	# X--	NAME	--X	# X--	NAME	--X	
1	NBASE		1			1			
44 BUSES		8 PLANTS		8 MACHINES		0 INDUCTION GENS		0 INDUCTION MOTORS	
17 LOADS		0 FIXED SHUNTS		1 SWITCHED SHUNTS					
43 BRANCHES		19 TRANSFORMERS		0 DC LINES		0 FACTS DEVICES		0 GNE DEVICES	
X----- ACTUAL -----X X----- NOMINAL -----X									
			MW	MVAR				MW	MVAR
FROM GENERATION			7.0	3.1				7.0	3.1
FROM INDUCTION GENERATORS			0.0	0.0				0.0	0.0
TO CONSTANT POWER LOAD			6.7	2.5				6.7	2.5
TO CONSTANT CURRENT			0.0	0.0				0.0	0.0
TO CONSTANT ADMITTANCE			0.0	0.0				0.0	0.0
TO INDUCTION MOTORS			0.0	0.0				0.0	0.0
TO BUS SHUNT			0.0	-0.9				0.0	-0.9
TO FACTS DEVICE SHUNT			0.0	0.0				0.0	0.0

Figura 32 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 3

Anexo G – Resultados relativos à simulação do cenário 4

Tabela 23 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 4

Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
1	NBASE	1	0	23	NLV9	0,9831	-3,28
2	NMV	0,9961	-1,31	24	NLV10	1	0,47
3	NMVL1	0,9954	-1,32	25	NMVR1	0,993	-1,29
4	NMVL2	0,995	-1,32	26	NLVR1	0,9793	-2,88
5	NMVL3	0,9949	-1,33	27	NMVR2	0,9908	-1,27
6	NMVL4	0,9947	-1,33	28	NLVR2	0,9772	-2,87
7	NMVL5	0,9946	-1,33	29	NMVR3	0,9891	-1,25
8	NMVL6	0,9955	-1,32	30	NMVR4	0,9892	-1,24
9	NMVL7	0,9951	-1,32	31	NMVR5	0,9883	-1,24
10	NMVL8	0,995	-1,32	32	NMVR6	0,988	-1,25
11	NMVL9	0,9948	-1,33	33	NLVR11	1	0,57
12	NMVL10	0,9947	-1,33	34	NLVR3	0,9746	-2,85
13	NVMTCHP	0,9946	-1,34	35	NLVR4	0,9742	-2,85
14	NMVCHP	0,9962	-2,06	36	NMVR8	0,9875	-1,24
15	NLV1	0,9838	-3,27	37	NMVR10	0,9867	-1,24
16	NLV2	0,9834	-3,27	38	NMVR11	0,985	-1,24
17	NLV3	1	0,47	39	NMVR12	0,9842	-1,24
18	NLV4	0,983	-3,28	40	NMVR13	0,9839	-1,24
19	NLV5	0,9829	-3,28	41	NLVR5	0,9736	-2,86
20	NLV6	0,9838	-3,27	42	NLVR6	0,9987	0,58
21	NLV7	0,9834	-3,27	43	NMVR14	0,9842	-1,24
22	NLV8	1	0,47	44	NMVR15	0,9839	-1,24

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E									
FRI, NOV 04 2016 21:45									
MESTRADO									
TESE									
***** SUMMARY FOR COMPLETE SYSTEM *****									
SYSTEM SWING BUS SUMMARY									
X-----	SWING BUS	-----X	X-----	AREA	-----X	X-----	ZONE	-----X	
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	# X--	NAME	--X	# X--	NAME	--X	
1	NBASE		1			1			
44 BUSES		8 PLANTS		8 MACHINES		0 INDUCTION GENS		0 INDUCTION MOTORS	
17 LOADS		0 FIXED SHUNTS		1 SWITCHED SHUNTS					
44 BRANCHES		19 TRANSFORMERS		0 DC LINES		0 FACTS DEVICES		0 GNE DEVICES	
X----- ACTUAL -----X X----- NOMINAL -----X									
		MW		MVAR		MW		MVAR	
FROM GENERATION		6.9		3.2		6.9		3.2	
FROM INDUCTION GENERATORS		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO CONSTANT POWER LOAD		6.7		2.5		6.7		2.5	
TO CONSTANT CURRENT		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO CONSTANT ADMITTANCE		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO INDUCTION MOTORS		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO BUS SHUNT		0.0		-0.9		0.0		-0.9	
TO FACTS DEVICE SHUNT		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO GNE BUS DEVICES		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO LINE SHUNT		0.0		0.0		0.0		0.0	

Figura 33 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 4

Anexo H – Resultados relativos à simulação do cenário 5

Tabela 24 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 5

Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
1	NBASE	1	0	23	NLV9	0,9818	-3,73
2	NMV	0,9956	-1,58	24	NLV10	1	0,21
3	NMVL1	0,9948	-1,59	25	NMVR1	0,9921	-1,56
4	NMVL2	0,9942	-1,6	26	NLVR1	0,9768	-3,32
5	NMVL3	0,9938	-1,61	27	NMVR2	0,9894	-1,55
6	NMVL4	0,9935	-1,62	28	NLVR2	0,9743	-3,31
7	NMVL5	0,9932	-1,63	29	NMVR3	0,9874	-1,53
8	NMVL6	0,9951	-1,59	30	NMVR4	0,9874	-1,53
9	NMVL7	0,9948	-1,59	31	NMVR5	0,9864	-1,53
10	NMVL8	0,9948	-1,59	32	NMVR6	0,9861	-1,53
11	NMVL9	0,9947	-1,59	33	NLVR11	0,9994	0,29
12	NMVL10	0,9948	-1,59	34	NLVR3	0,9713	-3,3
13	NVMTCHP	0,9931	-1,63	35	NLVR4	0,9708	-3,3
14	NMVCHP	0,9936	-2,49	36	NMVR8	0,9855	-1,53
15	NLV1	0,9819	-3,74	37	NMVR10	0,9845	-1,52
16	NLV2	0,9813	-3,75	38	NMVR11	0,9826	-1,52
17	NLV3	1	0,19	39	NMVR12	0,9817	-1,53
18	NLV4	0,9805	-3,77	40	NMVR13	0,9814	-1,53
19	NLV5	0,9803	-3,78	41	NLVR5	0,9701	-3,31
20	NLV6	0,9822	-3,73	42	NLVR6	0,9965	0,3
21	NLV7	0,9819	-3,74	43	NMVR14	0,9817	-1,53
22	NLV8	1	0,21	44	NMVR15	0,9814	-1,53

```

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E    FRI, NOV 04 2016  21:46
MESTRADO
TESE

***** SUMMARY FOR COMPLETE SYSTEM *****

                        SYSTEM SWING BUS SUMMARY
X----- SWING BUS -----X X----- AREA -----X X----- ZONE -----X
BUS#-SCT X-- NAME --X BASKV  # X-- NAME --X  # X-- NAME --X      MW      MVAR  MVABASE
   1  NBASE              1              1              I      5.5      1.0    100.0

44 BUSES          8 PLANTS          8 MACHINES      0 INDUCTION GENS      0 INDUCTION MOTORS
17 LOADS          0 FIXED SHUNTS      1 SWITCHED SHUNTS
43 BRANCHES      19 TRANSFORMERS      0 DC LINES      0 FACTS DEVICES      0 GNE DEVICES

                        X----- ACTUAL -----X X----- NOMINAL -----X
                        MW      MVAR      MW      MVAR
FROM GENERATION      7.8      3.3      7.8      3.3
FROM INDUCTION GENERATORS  0.0      0.0      0.0      0.0
TO CONSTANT POWER LOAD    7.4      2.8      7.4      2.8
TO CONSTANT CURRENT      0.0      0.0      0.0      0.0
TO CONSTANT ADMITTANCE    0.0      0.0      0.0      0.0
TO INDUCTION MOTORS      0.0      0.0      0.0      0.0
TO BUS SHUNT           0.0     -0.9      0.0     -0.9
TO FACTS DEVICE SHUNT    0.0      0.0      0.0      0.0
TO GNE BUS DEVICES      0.0      0.0      0.0      0.0
TO LINE SHUNT           0.0      0.0      0.0      0.0

```

Figura 34 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 5

Anexo I – Resultados relativos à simulação do cenário 6

Tabela 25 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 6

Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
1	NBASE	1	0	23	NLV9	0,9791	-4,17
2	NMV	0,9943	-1,81	24	NLV10	1	-0,01
3	NMVL1	0,9934	-1,82	25	NMVR1	0,9903	-1,79
4	NMVL2	0,9927	-1,83	26	NLVR1	0,9736	-3,72
5	NMVL3	0,9923	-1,84	27	NMVR2	0,9872	-1,78
6	NMVL4	0,9919	-1,85	28	NLVR2	0,9706	-3,72
7	NMVL5	0,9916	-1,86	29	NMVR3	0,9848	-1,76
8	NMVL6	0,9937	-1,81	30	NMVR4	0,9847	-1,75
9	NMVL7	0,9934	-1,82	31	NMVR5	0,9837	-1,76
10	NMVL8	0,9934	-1,82	32	NMVR6	0,9833	-1,76
11	NMVL9	0,9933	-1,82	33	NLVR11	0,9968	0,07
12	NMVL10	0,9934	-1,82	34	NLVR3	0,967	-3,71
13	NVMTCHP	0,9915	-1,87	35	NLVR4	0,9665	-3,7
14	NMVCHP	0,9908	-2,86	36	NMVR8	0,9827	-1,76
15	NLV1	0,9792	-4,17	37	NMVR10	0,9815	-1,75
16	NLV2	0,9785	-4,19	38	NMVR11	0,9794	-1,76
17	NLV3	1	-0,04	39	NMVR12	0,9784	-1,76
18	NLV4	0,9777	-4,21	40	NMVR13	0,9781	-1,76
19	NLV5	0,9774	-4,22	41	NLVR5	0,9658	-3,71
20	NLV6	0,9795	-4,16	42	NLVR6	0,9936	0,08
21	NLV7	0,9792	-4,17	43	NMVR14	0,9784	-1,76
22	NLV8	1	-0,01	44	NMVR15	0,9781	-1,76

```

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E    FRI, NOV 04 2016  21:47
MESTRADO
TESE

***** SUMMARY FOR COMPLETE SYSTEM *****

                        SYSTEM SWING BUS SUMMARY
X----- SWING BUS -----X X----- AREA -----X X----- ZONE -----X
BUS#-SCT X-- NAME --X BASKV  # X-- NAME --X  # X-- NAME --X      MW      MVAR  MVABASE
   1      NBASE              1              1              1              6.3      1.2    100.0

44 BUSES          8 PLANTS          8 MACHINES      0 INDUCTION GENS      0 INDUCTION MOTORS
17 LOADS           0 FIXED SHUNTS      1 SWITCHED SHUNTS
43 BRANCHES       19 TRANSFORMERS      0 DC LINES      0 FACTS DEVICES      0 GNE DEVICES

                        X----- ACTUAL -----X X----- NOMINAL -----X
                                MW      MVAR      MW      MVAR
FROM GENERATION              8.6      3.6      8.6      3.6
FROM INDUCTION GENERATORS    0.0      0.0      0.0      0.0
TO CONSTANT POWER LOAD       8.1      3.1      8.1      3.1
TO CONSTANT CURRENT          0.0      0.0      0.0      0.0
TO CONSTANT ADMITTANCE       0.0      0.0      0.0      0.0
TO INDUCTION MOTORS          0.0      0.0      0.0      0.0
TO BUS SHUNT                 0.0     -0.9      0.0     -0.9
TO FACTS DEVICE SHUNT        0.0      0.0      0.0      0.0
TO GNE BUS DEVICES           0.0      0.0      0.0      0.0
TO LINE SHUNT                0.0      0.0      0.0      0.0

```

Figura 35 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 6

Anexo J – Resultados relativos à simulação do cenário 7

Tabela 26 – Tensões nos barramentos relativas ao cenário 7

Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Número do Barramento	Nome do Barramento	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
1	NBASE	1	0	23	NLV9	0,9876	-1,93
2	NMV	1	0	24	NLV10	1	1,79
3	NMVL1	0,9993	-0,01	25	NMVR1	0,9971	0,02
4	NMVL2	0,9988	-0,02	26	NLVR1	0,9834	-1,56
5	NMVL3	0,9985	-0,03	27	NMVR2	0,995	0,04
6	NMVL4	0,9982	-0,03	28	NLVR2	0,9814	-1,54
7	NMVL5	0,998	-0,04	29	NMVR3	0,9934	0,06
8	NMVL6	0,9996	0	30	NMVR4	0,9934	0,07
9	NMVL7	0,9993	-0,01	31	NMVR5	0,9925	0,07
10	NMVL8	0,9993	0	32	NMVR6	0,9922	0,07
11	NMVL9	0,9993	0	33	NLVR11	1	1,88
12	NMVL10	0,9993	0	34	NLVR3	0,9789	-1,52
13	NVMTCHP	0,9978	-0,04	35	NLVR4	0,9784	-1,51
14	NMVCHP	0,9852	0,06	36	NMVR8	0,9918	0,07
15	NLV1	0,9877	-1,94	37	NMVR10	0,991	0,08
16	NLV2	0,9872	-1,95	38	NMVR11	0,9894	0,07
17	NLV3	1	1,77	39	NMVR12	0,9885	0,07
18	NLV4	0,9865	-1,97	40	NMVR13	0,9882	0,07
19	NLV5	0,9863	-1,98	41	NLVR5	0,978	-1,53
20	NLV6	0,9879	-1,93	42	NLVR6	1	1,88
21	NLV7	0,9877	-1,94	43	NMVR14	0,9885	0,07
22	NLV8	1	1,79	44	NMVR15	0,9882	0,07

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E									
FRI, NOV 04 2016 21:49									
MESTRADO									
TESE									
***** SUMMARY FOR COMPLETE SYSTEM *****									
SYSTEM SWING BUS SUMMARY									
X-----	SWING BUS	-----X	X-----	AREA	-----X	X-----	ZONE	-----X	
BUS#-SCT	X-- NAME	--X BASKV	# X--	NAME	--X	# X--	NAME	--X	
2	NMV		1			1			
44 BUSES		8 PLANTS		8 MACHINES		0 INDUCTION GENS		0 INDUCTION MOTORS	
17 LOADS		0 FIXED SHUNTS		1 SWITCHED SHUNTS					
43 BRANCHES		19 TRANSFORMERS		0 DC LINES		0 FACTS DEVICES		0 GNE DEVICES	
X----- ACTUAL -----X X----- NOMINAL -----X									
		MW		MVAR		MW		MVAR	
FROM GENERATION		6.7		1.9		6.7		1.9	
FROM INDUCTION GENERATORS		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO CONSTANT POWER LOAD		6.7		2.5		6.7		2.5	
TO CONSTANT CURRENT		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO CONSTANT ADMITTANCE		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO INDUCTION MOTORS		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO BUS SHUNT		0.0		-0.9		0.0		-0.9	
TO FACTS DEVICE SHUNT		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO GNE BUS DEVICES		0.0		0.0		0.0		0.0	
TO LINE SHUNT		0.0		0.0		0.0		0.0	

Figura 36 – Relatório-resumo do PSS/E da execução do estudo de trânsito de potências do cenário 7